

# **FEM-Simulation des Festwalzprozesses**

An der

**Hochschule Mittweida** (FH)

Fakultät Maschinenbau/Feinwerktechnik

Studiengang Mechatronik

eingereichte

# **Bachelorarbeit**

vorgelegt von Ru Zhang

geboren am 09. Februar 1987 in China

Mentor : Prof. Dr. –Ing. Mahn

Zweitgutachter : Dipl. -Ing. Hähnel

Mittweida, den 09. September 2009

# **Bibliographische Beschreibung**

Zhang ,Ru :

FEM Simulation des Festwalzprozesses. -2009. -58S.  
an der Hochschule Mittweida (FH) - Fakultät Maschinenbau/Feinwerktechnik,  
Bachelorarbeit - Mittweida 2009.

## **Referat:**

Ziel der Bachelorarbeit ist es, ein Festwalzprozess im FE-Programm ANSYS zu simulieren. Dazu muss das Modell zuerst gebaut werden. Danach wird der Simulationstyp definiert. Am Ende können die Ergebnisse der Simulation bestimmt und analysiert werden.

# Inhaltsverzeichnis

I . Formelverzeichnis.....	IV
<b>1 Aufgabestellung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Grundlagen des Festwalzens.....	1
1.2 Übersicht der Aufgabe.....	1
1.3 Parameter von der Aufgabe.....	2
1.4 Teilaufgaben.....	3
<b>2 Modellierung.....</b>	<b>4</b>
2.1 Werkstück.....	4
2.1.1 Methode der Modellierung.....	4
2.1.2 Die Positionen der Keypoints.....	4
2.2 Werkzeug.....	5
2.2.1 Methode der Modellierung.....	5
2.2.2 Die Position des lokalen Koordinatensystems.....	5
2.2.3 Die Position der Keypoints der Rolle im CS11.....	6
<b>3 Vernetzung.....</b>	<b>8</b>
3.1 Material un Elementtyp.....	8
3.1.1 Material.....	8
3.1.2 Elementtyp.....	9
3.2 Vernetzung des Werkstücks.....	10
3.3 Vernetzung des Werkzeugs.....	12
<b>4 Definition vom Kontakt.....</b>	<b>13</b>
4.1 Kontakttyp.....	13
4.2 Real-definition.....	13
4.3 “Element Key”-definition.....	14
4.4 Erstellung der Kontakt-Gruppe.....	15
<b>5 Randbedingungen.....</b>	<b>16</b>
<b>6 Rechnungen der Bewegungen.....</b>	<b>17</b>
6.1 Beschreibung der Bewegungen des Festwalzprozesses.....	17
6.2 Methode der Lösung in ANSYS.....	17
6.3 Bewegungsrechnungen für 2D-Schnittmodell.....	18
6.3.1 Erster Bewegung: Eindringen.....	18
6.3.2 Zweite Bewegung: Abrollen.....	22
6.3.3 Letzte Bewegung: Verlassen.....	27
6.4 Bewegungsrechnungen für 3D-Modell.....	28
<b>7 Berechnung der Eindringkraft.....</b>	<b>29</b>
<b>8 Vermessung der Eigenspannungen.....</b>	<b>32</b>
8.1 Aufgabe 1.....	32
8.2 Aufgabe 2.....	36
II . Das ANSYS – Modell.....	V

III. Literaturverzeichnis.....	X VII
IV. Eidesstattliche Erklärung.....	X VIII

# I. Formelverzeichnis

$b = \sqrt{R^2 - (R - 0.4)^2}$ .....Hilfswert [mm] (Tabell 2).....	5
KP.....Keypoint.....	5
CS..... coordinate system.....	5
$\sigma_w$ .....wahre Spannung [Mpa] (Gl.7).....	8
$\sigma_t$ .....technische Spannung [Mpa] (Gl.7).....	8
$\varepsilon_w$ .....wahre Dehnung [Mpa] (Gl.7).....	8
$\varepsilon_t$ .....technische Dehnung [Mpa] (Gl.8).....	8
x1.....Länge der blauen Linie [mm] (Abb.12).....	10
y1.....Länge der roten Linie [mm] (Abb.12).....	10
$\Phi_{\text{Ink}}$ .....Inkrement des Grad jedes Schrittes.....	17
rr.....Distanz zwischen Knoten 0 und Knoten 1 [mm].....	18
UX.....Verschiebung des Knotens in X richtung [mm] (Gl.11).....	19
UY.....Verschiebung des Knotens in Y richtung [mm] (Gl.11).....	19
Ur0.....Distanz zwischen Knoten 0 und Mittelpunkt der Probe [mm].....	19
Ur1.....Distanz zwischen Knoten 1 und Mittelpunkt der Probe [mm].....	19
Ur2.....Distanz zwischen Knoten 2 und Mittelpunkt der Probe [mm].....	19
Ur3.....Distanz zwischen Knoten 3 und Mittelpunkt der Probe [mm].....	20
$\Psi$ ..... Hilfsgrad (Gl.14).....	20
Ur4.....Distanz zwischen Knoten 4 und Mittelpunkt der Probe [mm].....	21
$\Phi_0$ .....Rotationsgrad vom Knoten 0 um Mittelpunkt der Probe.....	22
$\alpha$ ..... Rotationsgrad der Rolle um Mittelpunkt der Rolle (Gl.19).....	22
$\Theta$ ..... Hilfsgrad (Gl.22).....	23
$\beta$ ..... Hilfsgrad (Gl.24).....	23
$\Phi_1$ .....Rotationsgrad vom Knoten 1 um Mittelpunkt der Probe.....	23
$\Phi_2$ .....Rotationsgrad vom Knoten 2 um Mittelpunkt der Probe.....	24
$\Phi_3$ .....Rotationsgrad vom Knoten 3 um Mittelpunkt der Probe.....	25
$\Phi_4$ .....Rotationsgrad vom Knoten 4 um Mittelpunkt der Probe.....	26
$\gamma$ ..... Hilfsgrad (Gl.38).....	25
FR.....Eindringkraft [kN] (Gl.60).....	29
t.....Eindringtiefe [mm] (Tabell5 und Tabell6).....	31
SX.....radiale Spannung [Mpa].....	32
SY.....tangentielle Spannung [Mpa] .....	32
SZ.....axiale Spannung [Mpa] .....	32

# 1. Aufgabenstellung

## 1.1 Grundlagen des Festwalzens

Das Festwalzen ist das einzige Randschicht- verfestigungsverfahren, welches eine Glättung der Oberfläche, die Induzierung von Eigenspannungen und eine Kaltverfestigung bewirkt. Hierdurch ergibt sich eine außerordentliche Steigerung der Schwingfestigkeit. Der Anwendungsbereich des Festwalzens erstreckt sich nahezu über das gesamte Spektrum der metallischen Werkstoffe.

Im Zusammenspiel mit der Verringerung der Rautiefe und der Kaltverfestigung ergeben sich durch die Anwendung des Festwalzens spürbare Steigerungen der Lebensdauer eines Bauteils. [1]

## 1.2 Übersicht der Aufgabe

Anhand der in Abb.1 dargestellten Geometrie einer Rundprobe soll das Festwalzen der Radien  $R$  im Einstichverfahren für die ADI-Gusswerkstoffe EN GJS-800-8 und EN GJS-1000-5 mit ANSYS simuliert werden.

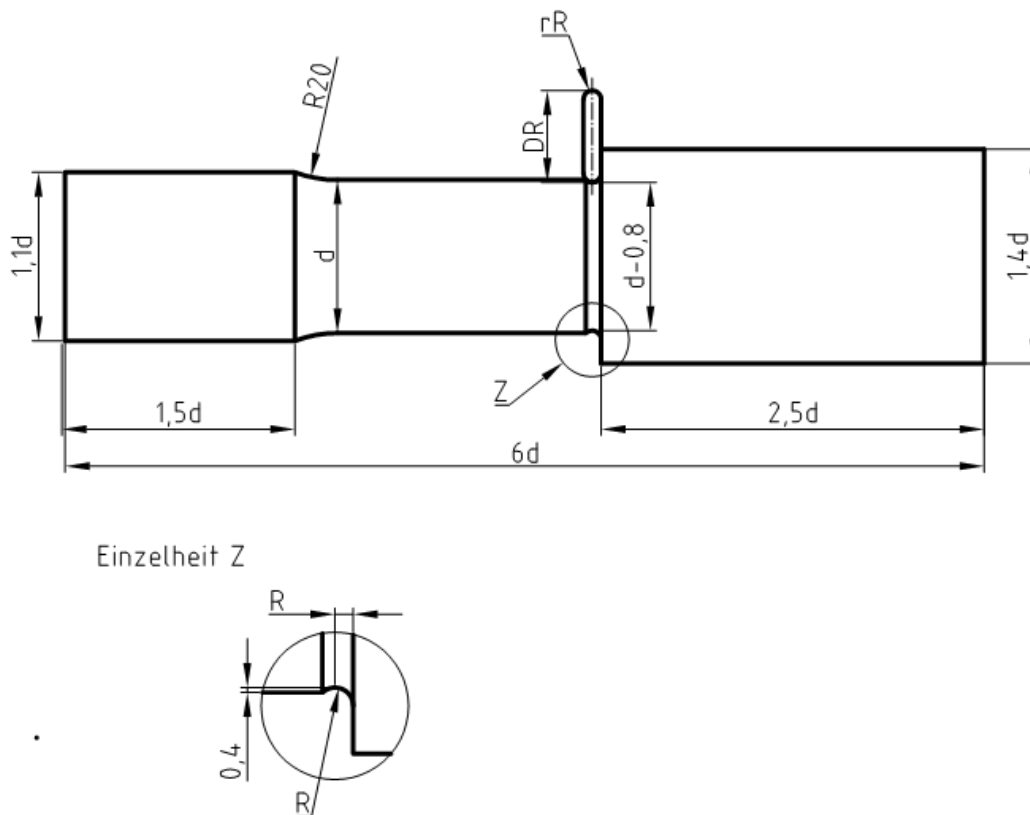


Abb.1: Geometrie der Probe und der Walzrolle

### 1.3 Parameter von der Aufgabe

- Konstruktive Parameter

- Probendurchmesser d:  $d_1 = 25\text{mm}$   
 $d_2 = 30\text{mm}$
- Radius R:  $R_1 = 1,1\text{mm}$   
 $R_2 = 1,5\text{mm}$

- Fesrwalzparameter

- Rollendurchmesser  $D_R$ :  $D_R = 15\text{mm}$
- Profilradius der Walzrolle  $r_R$ : für  $R_1 \rightarrow r_{R1} = 1,1\text{mm}$   
für  $R_2 \rightarrow r_{R2} = 1,45\text{mm}$
- Anstellwinkel der Walzrolle  $\alpha_w$ :  $\alpha_{w1} = 0^\circ$
- Festwalzkraft  $F_w$ :  $F_{w1} = 6\text{kN}$   $F_{w3} = 10\text{kN}$   
 $F_{w2} = 8\text{kN}$   $F_{w4} = 12\text{kN}$

- Werkstoffkenngrößen

- Fließkurven zur Charakterisierung des Werkstoffverhaltens von EN GJS-800-8 und EN GJS-1000-5

Tabelle 1: Werkstoff-Einflussgrößen

Werkstoff	E-Modul E [GPa]	Poisson'sche Konstante $\nu$
EN GJS-800-8	170	2,7
EN GJS-1000-5	168	2,7
Stahl (Walzrolle)	210	3,0

## 1.4 Teilaufgaben

1. Erstellung eines dreidimensionalen FE-Modells von der Probe mit der Walzrolle
2. Simulation der verschiedenen Beanspruchungsfälle durch Variation der konstruktiven Parameter ( $d$ ,  $R$ ) und der Festwalzparameter ( $F_w$ ,  $\alpha_w$ ) für beide Werkstoffe
3. Ermittlung der axialen, radialen und tangentialen Eigenspannungen (Betrag, Verteilung) für den jeweiligen Beanspruchungsfall in Form eines Tiefenprofils
4. Ermittlung der Einwalztiefe (plastische Dehnung) für den jeweiligen Beanspruchungsfall
5. Welchen Einfluss haben der Probendurchmesser  $d$  auf den Betrag bzw. die Verteilung der Eigenspannungen?
6. Bei welcher Festwalzkraft  $F_w$  treten für den jeweiligen ADI-Werkstoff und Radius  $R$  die höchsten Druckeigenspannungen auf?



## 2. Modellierung

### 2.1 Werkstück

#### 2.1.1 Methode der Modellierung

- Der Schnitt durch die Probe ist symmetrisch zur Mittellinie. Um einfach das Modell zu analysieren, wird also zuerst nur die Hälfte auf der XY-Ebene in ANSYS gezeichnet. Danach wird das Volumen mit dem Befehl, VROTAT' erstellt.
- Es gibt einige Abschnitte der Probe, die bei der Beanspruchung im Festwalzprozess nicht beeinflusst werden. D.h. die Darstellung dieser Abschnitte im Modell ist nicht notwendig. Dadurch wird die Rechenzeit erheblich verkürzt.

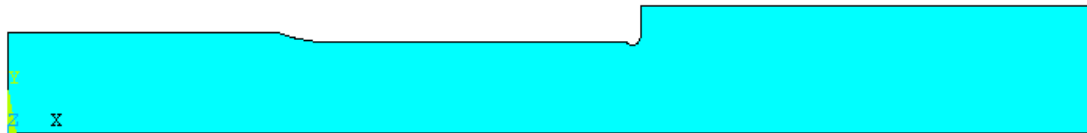


Abb.2: Komplette Schnittfläche in XY-Ebene

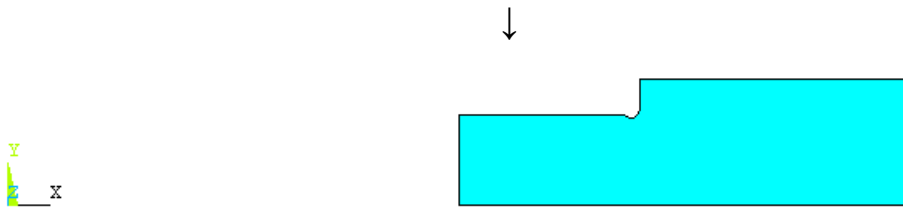


Abb.3: Vereinfachte Schnittfläche in XY-Ebene

#### 2.1.2 Die Positionen der Keypoints

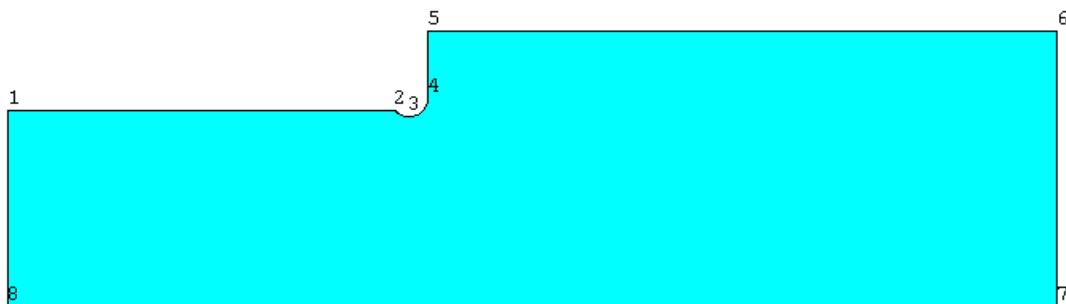


Abb.4: Keypoints in der Probe

Tabelle 2: Die Positionen der Keypoints von der Probe im CS 0

Nummer von KP	X	Y
KP 1	$2.5*d$	$d/2$
KP 2	$3.5*d-R-b$	$d/2$
KP 3	$3.5*d-R$	$d/2-0.4$
KP 4	$3.5*d$	$d/2-0.4+R$
KP 5	$3.5*d$	$1.4*d/2$
KP 6	$4.5*d$	$1.4*d/2$
KP 7	$4.5*d$	0
KP 8	$2.5*d$	0
*KP 20	$3.5*d-R$	$d/2-0.4+R$

(\*Keypoint 20 ist nicht in der Abbildung. Es ist der Mittelpunkt der Kurve von Keypoint 2 bis Keypoint 4)

## 2.2 Werkzeug

### 2.2.1 Methode der Modellierung

Der Schnitt durch die Walzrolle ist auch symmetrisch zur Mittellinie (Rotationsachse), deshalb wird auch nur die Hälfte auf der XY-Ebene in ANSYS gezeichnet. Dann wird das Volumen mit dem Befehl ‚VROTAT‘ erstellt.

### 2.2.2 Die Position des lokalen Koordinatensystems

- Um einfach die Positionen der Keypoints zu bestimmen, kann ein lokales Koordinatensystem zuerst im Mittelpunkt der Walzrolle erstellt werden.

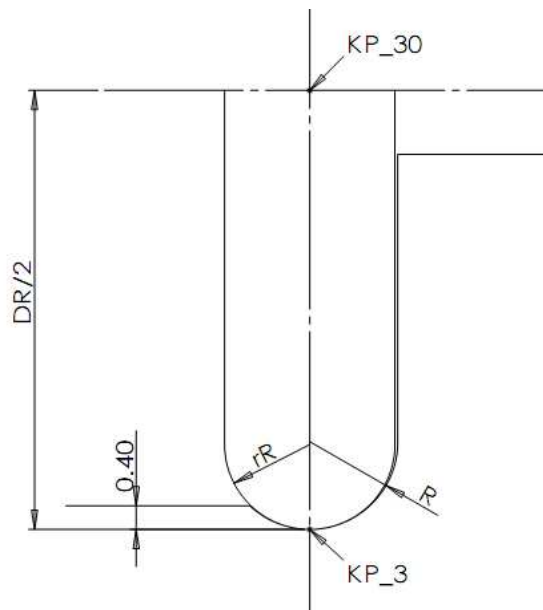


Abb.5 :die Position von KP\_3 und KP\_30

In Abb.5 können wir sehen, dass der Ursprung des lokalen Koordinatensystems 11(CS\_11) in der Position von Keypunkt\_30(KP\_30) sein soll. Im realen Festwalzprozess soll der Mittelpunkt(KP\_3) der Kurve von Kerbe und der Mittelpunkt von der Rolle in einer geraden Linie sein. Deshalb ist es einfach, die Position von KP\_30 zu bestimmen, wenn die Position von KP\_3 schon bekannt ist.

**Die Position von KP\_3:**  $X(KP_3) = 3.5 \cdot d - R$  (Gl.1)

$Y(KP_3) = d/2 - 0.4$  (Gl.2)

**Dann ist die Position von KP\_30:**  $X(KP_{30}) = X(KP_3) = 3.5 \cdot d - R$  (Gl.3)

$Y(KP_{30}) = Y(KP_3) + DR/2 = d/2 - 0.4 + DR/2$  (Gl.4)

**Die Position von CS\_11 ist gleich wie KP\_30**

$X(CS_{11}) = 3.5 \cdot d - R$  (Gl.5)

$Y(CS_{11}) = d/2 - 0.4 + DR/2$  (Gl.6)

### 2.2.3 Die Position der Keypoints der Rolle im CS11

Mit dem Befehl ,CSYS 11' können die Keypoints in der Schnittfläche der Rolle im aktiven Koordinatensystem CS\_11 schneller erstellt werden.

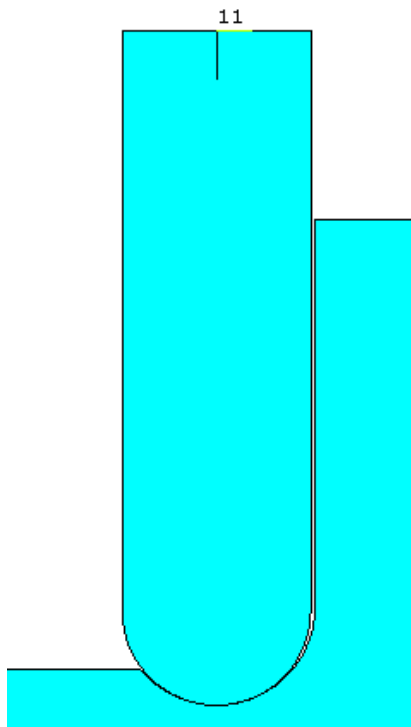


Abb.6: CS11

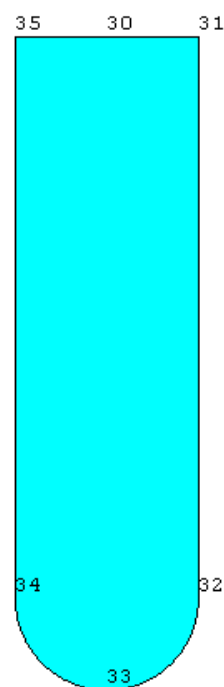


Abb.7: KP in der Schnittfläche der Rolle

Tabelle 3: Die Positionen der Keypoints von der Rolle im CS 11

Nummer von KP	X	Y
KP 30	0	0
KP 31	0	rR
KP 32	$DR/2 - rR$	rR
KP 33	$DR/2$	0
KP 34	$DR/2 - rR$	-rR
KP 35	0	-rR
*KP 36	$DR/2 - rR$	0

(\*Keypoint 36 ist nicht in der Abbildung. Es ist der Mittelpunkt der Kurve von Keypoint 32 bis Keypoint 34)

### 3. Vernetzung

#### 3.1 Material und Elementtyp

##### 3.1.1 Material

Die Technischen Spannungs- und Dehnungswerte der zwei Materialien sind schon gegeben. Durch die Gleichungen (Gl.7) und (Gl.8) kann die Technische Spannungs- und Dehnungswerte in wahre Spannungs-Dehnungswerte übertragen werden.

Umrechnung technische/wahre Werte:

$$\sigma_w = \sigma_t (1 + \varepsilon_t) \quad (\text{Gl.7})$$

$$\varepsilon_w = \ln(1 + \varepsilon_t) \quad (\text{Gl.8})$$

##### • Die Wahre Spannungs-Dehnungswerte von EN GJS-800-8

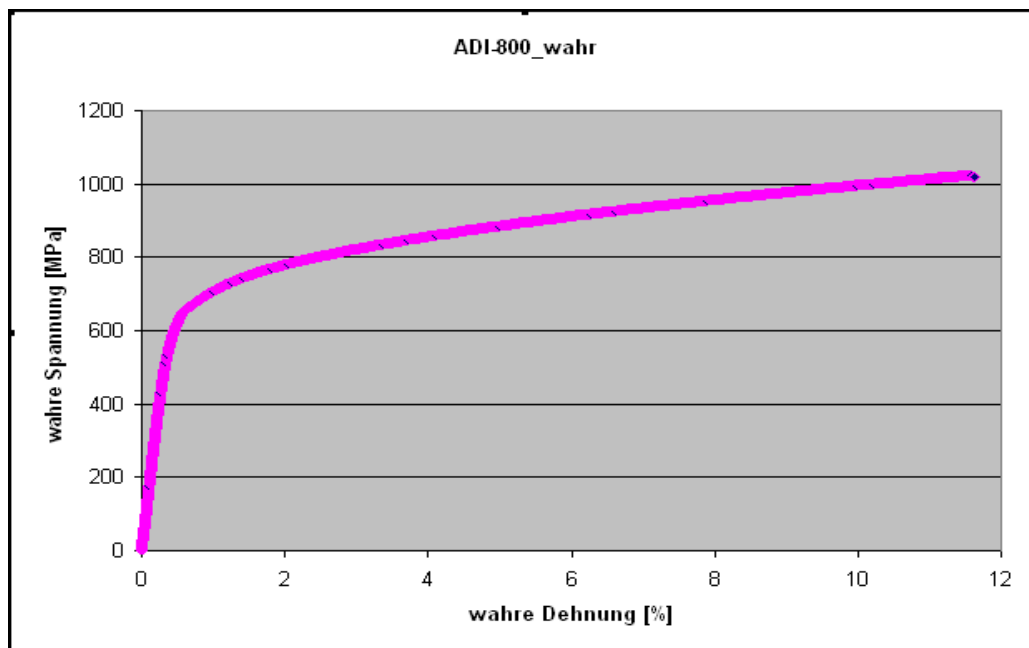


Abb.8

**Die Streckgrenze ist ca. 650 MPa**

- Die Wahre Spannungs-Dehnungswerte von EN GJS-1000-5

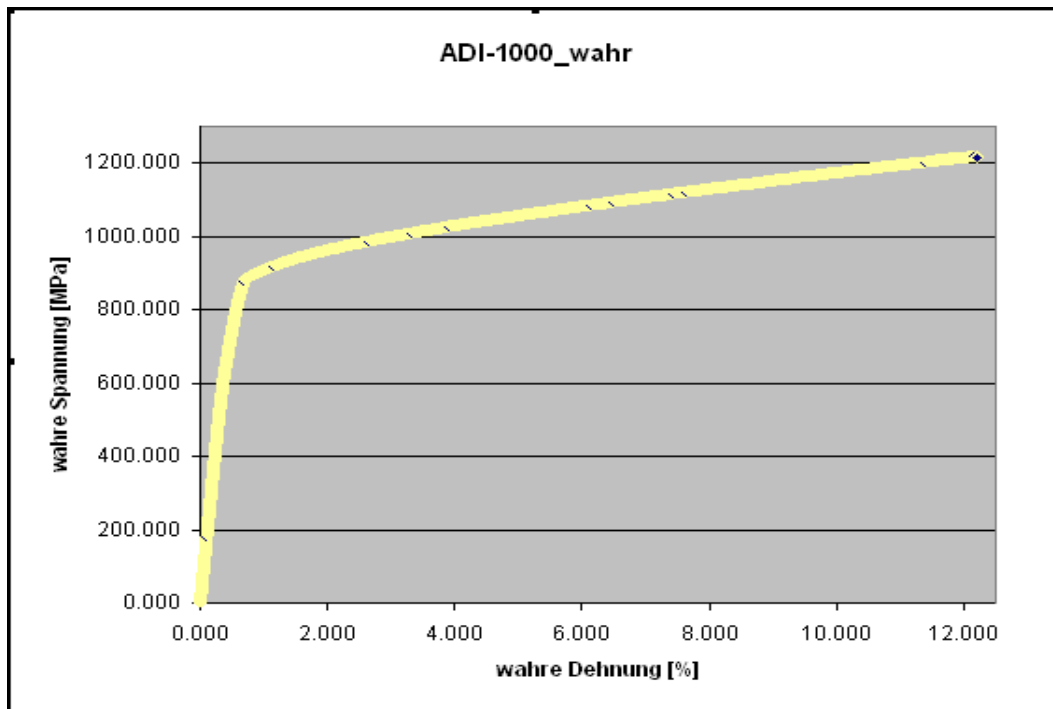


Abb.9

**Die Streckgrenze ist ca. 900 MPa**

Die Daten der zwei Materialien werden in die Unterprogramme ADI\_800.inp und ADI\_1000 geschrieben, damit diese im Hauptprogramm von ANSYS aufgerufen werden können.

### 3.1.2 Elementtyp

**1.Elementtyp : SOLID 45**

**Elementtyp für Probe:** 1.Elementtyp

**Elementtyp für Rolle :** 1.Elementtyp

Obwohl die Zahl von DOF von SOLID 45 gering ist, hat das Ergebnis noch eine hohe Genauigkeit, wenn die Modelle kartografisch vernetzt werden. Außerdem kann die Rechenzeit reduziert werden.

### 3.2 Vernetzung des Werkstücks

Um die Rechenzeit zu reduzieren, soll die Zahl von DOF reduziert werden. Es ist besser, das Modell kartografisch zu vernetzen. Das Volumen ist nicht regelrecht sichtbar. Deshalb soll das Volumen in einige regelrechte Volumina geteilt werden. Die Schnittfläche kann zuerst in einige regelrechte Flächen geteilt werden, dann werden die Volumen auch regelrecht sein, welche in der Schnittfläche mit ‚VROTAT‘ erstellt werden.

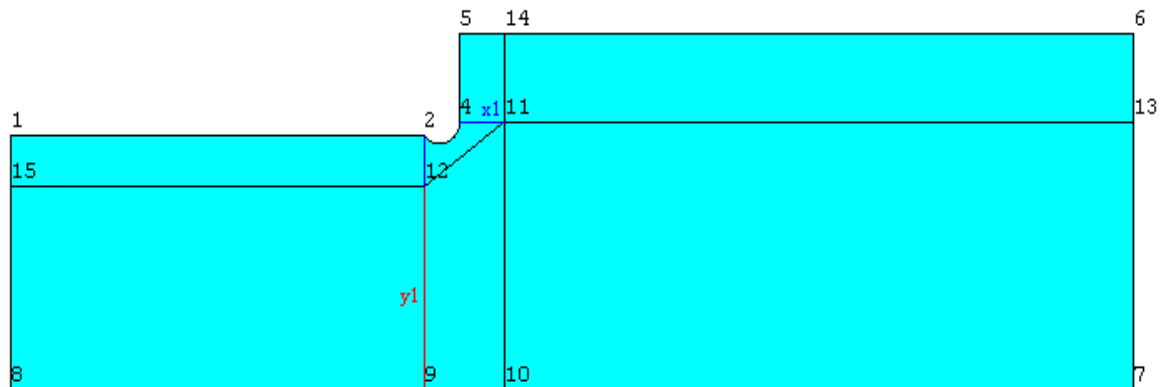


Abb.10: verteilte Schnittfläche der Probe

In Abb.12 :  $x1=0.1*d$   $y1=d/2-x1$

Tabelle 4: Die Positionen der Keypoints von der Verteilung im CS 0

Nummer von KP	X	Y
KP 9	$3.5*d-R-b$	0
KP 10	$3.5*d+x1$	0
KP 11	$3.5*d+x1$	$d/2-0.4+R$
KP 12	$3.5*d-R-b$	$y1$
KP 13	$5*d$	$d/2-0.4+R$
KP 14	$3.5*d+x1$	$1.4*d/2$
KP 15	$2.5*d$	$y1$

Weil der Festwalzprozess eine Kontakt-Aufgabe darstellt, sollen die Kontakt-Fläche und die Target-Fläche fein vernetzt werden. Deshalb muss die Fläche in der Kerbe der Probe fein vernetzt werden. Mit dem Befehl ‚LESIZE‘ kann die Kurve der Kerbe fein vernetzt werden.

Nach der Erstellung der Volumina kann die ganze Probe einfach beim 1.Materialtyp und 1.Elementtyp vernetzt werden.

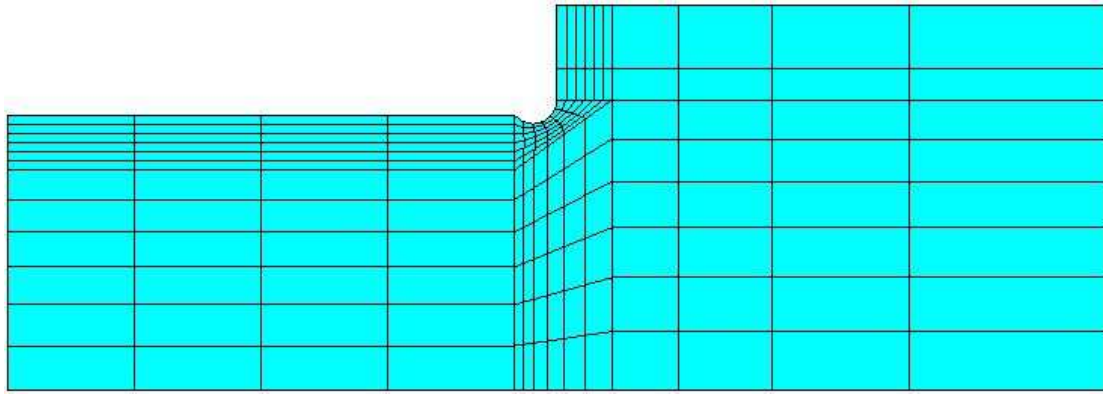


Abb.11: vernetzte Schnittfläche der Probe

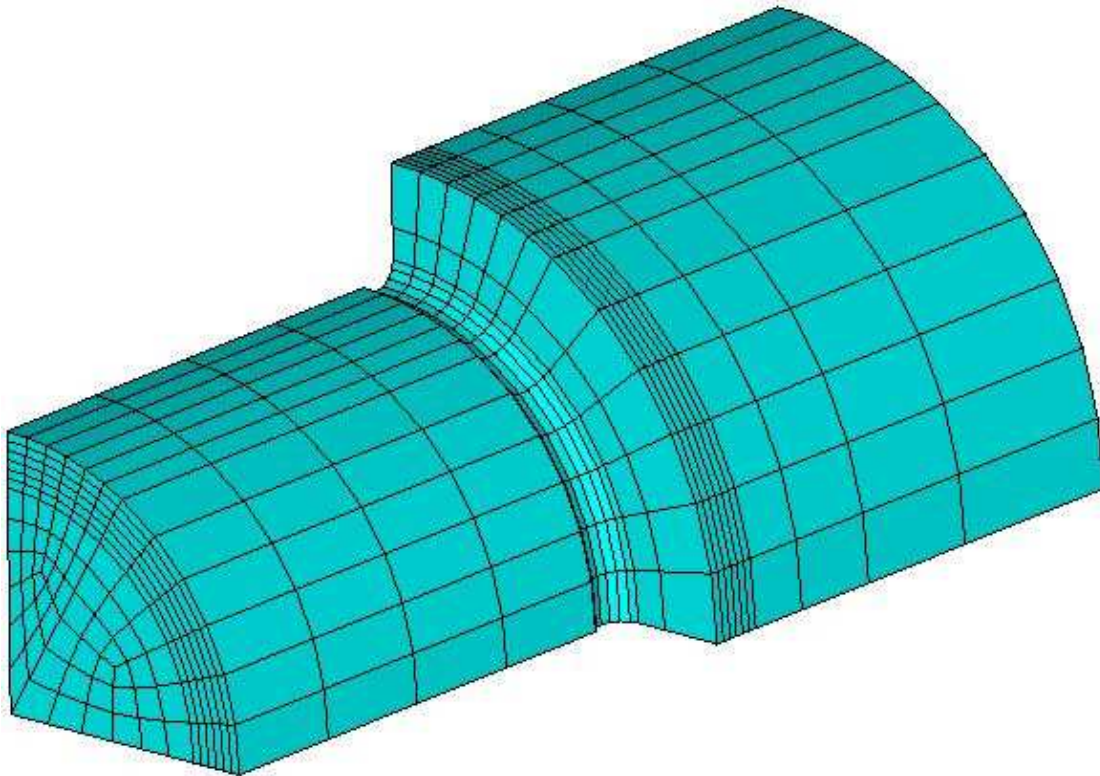


Abb.12: vernetzte Probe



### 3.3 Vernetzung des Werkzeugs

Die Methode der Vernetzung der Walzrolle ist gleich wie die für die Probe.

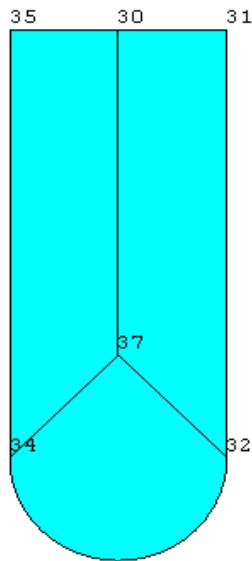


Abb.13: verteilte Schnittfläche der Rolle

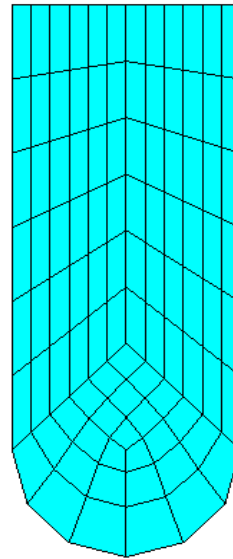


Abb.14: vernetzte Schnittfläche der Rolle

Die Position von KP 37 von der Verteilung im CS 11:

$$X(KP\ 37)=DR/2-2*rR \quad , \quad Y(KP\ 37)=0$$

Die Fläche im Profil der Rolle muss fein vernetzt werden. Mit dem Befehl ‚LESIZE‘ kann die Kurve des Profils fein vernetzt werden.

Nach der Erstellung des Volumens, kann die ganze Rolle einfach beim 2.Materialtyp und 1.Elementtyp vernetzt werden.

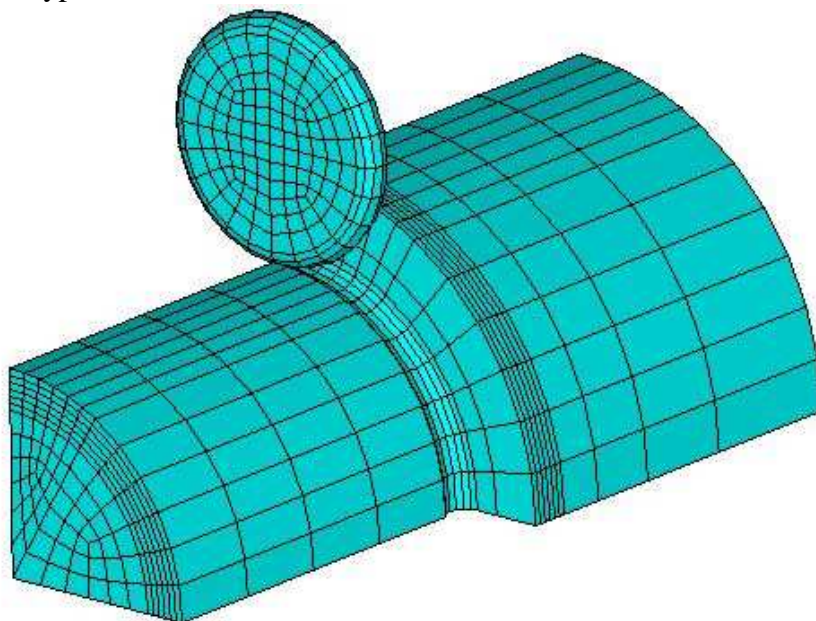


Abb.15: vernetzes Modell

## 4. Definition vom Kontakt

### 4.1 Kontakttyp

- elastisch zu elastisch
  - Das Werkstück ist elastisch-plastisch
  - Die Walzrolle ist rein elastisch
- Fläche zur Fläche
  - “Contact”-Fläche: Die Oberfläche der Kerbe vom Werkstück
  - “Target”-Fläche: Die Oberfläche des Profils vom Werkstück
  - Elementtyp (ET):
    - 2.ET “CONTAC173” für “Contact”-Fläche
    - 3.ET “TARGET170” für “Target”-Fläche

### 4.2 Real-Definition

“CONTAC173” und “TARGET170” gehören zu einer Kontakt-Gruppe, deshalb soll das “Real” dieser zwei Elementtypen gleich sein. Das “Real” ist in dieser Aufgabe “Real 3”.

#### Definition des “Real 3”:

R,3,,,0.5,0.2,0.001,,,,(**SIGMAF**\*0.577),0.0,1.0,,  
! 1 - R1 (intern)  
! 2 - R2 (intern)  
! 3 - FKN - Kontaktsteifigkeit (default: 1.0)  
! 4 - FTOL (default: 0.1)  
! 5 - ICONT - initial closure  
! 6 - PINB  
! 7 - PMIN  
! 8 - PMAX  
! 9 - TAUMAX (**SIGMAF**\*1/sqrt(3))  
!10 - CNOF - contact offset  
!11 - FKOP  
!12 - FKT  
!13 - COHE sliding resistance (0)

\* **SIGMAF** ist der Parameter der Streckgrenze des Materials vom Werkstück.

### 4.3 “Element Key”-Definition

Außer der Real-Definition soll “Element Key” noch definiert werden. Damit ist die Definition des Kontaktproblems komplett und exakt.

#### **Definition des “Element Key” von 3.ET “TARGET170”:**

KEYOPT,3,1,	! 1 - only structural contact
KEYOPT,3,2,0	! 2 - Algorithmus: 0 - Penalty function + Lagrange multiplier
KEYOPT,3,3,0	! 3 - Use with h-elements (no superelements)
KEYOPT,3,4,0	! 4 - Location of contact detection point: 0 - Gauss-Point
KEYOPT,3,5,	! 5 - CNOF Automated adjustment
KEYOPT,3,6,	! 6 - Symmetrical stiffness matrix
KEYOPT,3,7,0	! 7 - Element level time inc. control.; 0 - No control
KEYOPT,3,8,0	! 8 - Suprious Contact Prevention 0 - no prevention
KEYOPT,3,9,0	! 9 - include both init. - geom. penet. or gap and offset
KEYOPT,3,10,0	!10 - Contact stiffness update: 0 - no update
KEYOPT,3,11,0	!11 - Beam/Shell Thickness Effect: 0 - None
KEYOPT,3,12,0	!12 - Behavior of contact surface: 0 – Standart

## 4.4 Erstellung der Kontakt-Gruppe

- Da der Kontakttyp elastisch zu elastisch ist, sollen “CONTAC173” und “TARGET170” mit dem Befehl “ESURF” auf die Oberfläche der Kerbe und des Profils gelegt werden.
- Die Walzrolle rollt nur 30° ab. Deshalb werden die Teiloberflächen von der Rolle und der Kerbe der Probe gebraucht, um die Kontaktelemente zu positionieren.

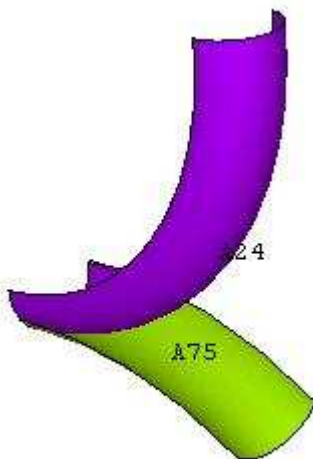


Abb.16: Oberfläche der Kerbe und der Walzrolle

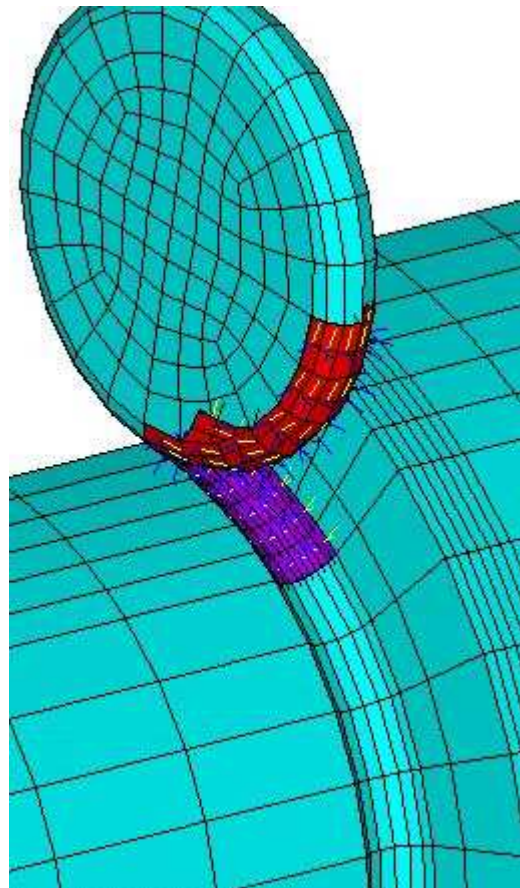


Abb.17: Erstellte Kontakt- und Targetfläche

## 5. Randbedingungen

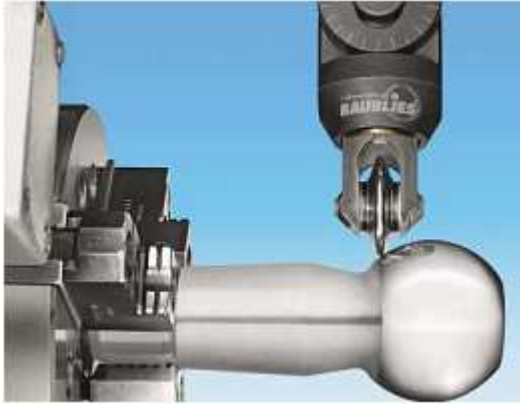


Abb.18: realer Festwalzprozess [2]

- In Abb.20 können wir sehen, dass das Probenende eingespannt werden sollen. In der Aufgabe ist das Modell vereinfacht und nicht komplett dargestellt. Deshalb wird die Schnittfläche am Probenende nur in X Richtung eingeschränkt.

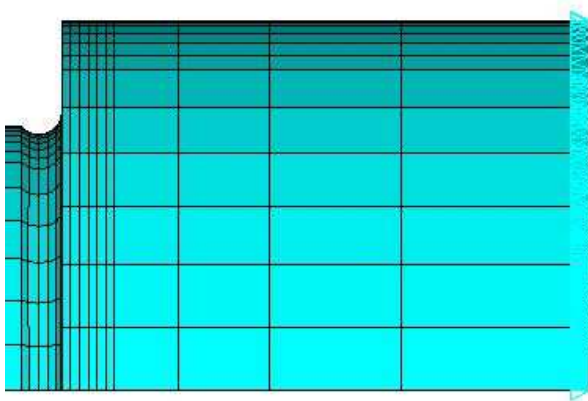


Abb.19: Randbedingung am Probenende

- Um symmetrische Eigenschaften zu erhalten, sollen die zwei Schnittflächen des Viertelmodells in Y – und Z- Richtung eingeschränkt werden.

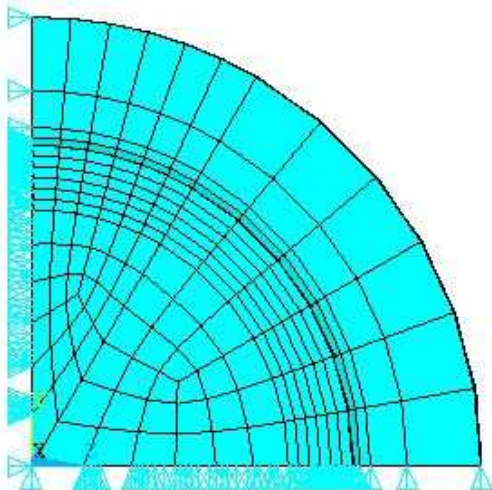


Abb.20: Symmetrierandbedingung

## 6. Rechnungen der Bewegungen

### 6.1 Beschreibung der Bewegungen des Festwalzprozesses

Der Festwalzprozess besteht aus drei verschiedenen Bewegungen:

Erste Bewegung: Die Walzrolle dringt in die Probe.

Zweite Bewegung: Die Walzrolle rollt auf der Probe ab.

Letzte Bewegung: Die Walzrolle ist weg von der Probe.

### 6.2 Methode der Lösung in ANSYS

- In ANSYS können wir finden, dass die Bahnen der drei Bewegungen nur in der YZ-Ebene sind. Deshalb kann diese Bewegungsaufgabe zuerst in eine 2D Aufgabe vereinfacht werden. Dann können die Bewegungsgleichungen in eine 3D Aufgabe übertragen werden.

- Die Achse in der Mitte der realen Walzrolle (Abb.21) kann die Bewegungen der Rolle steuern. In ANSYS können fünf Knoten in der Mitte der Rolle ausgewählt werden, um die Achse zu ersetzen.

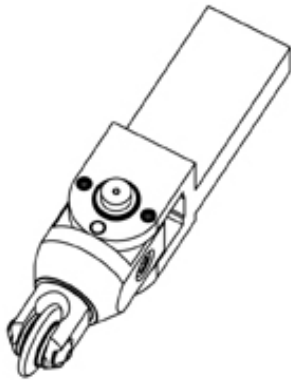


Abb.21: reale Walzrolle [2]

- Durch den Befehl “D” können die Knoten verschoben werden.
- Die Abrollbewegung ist mit dem Schleifenbefehl “\*DO...\*ENDO” zu realisieren. Diese Bewegung soll in  $k$  Schritte geteilt werden. In jedem Schritt rotiert die Rolle um die Probe um Grad ( $\Phi_{Ink}$ ). Der gesamte Rotationsgrad ist  $k \times \Phi_{Ink}$ .

## 6.3 Bewegungsrechnungen für 2D-Schnittmodell

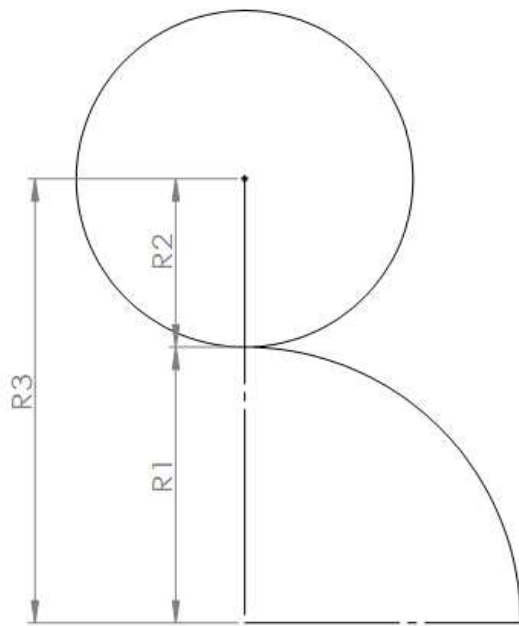


Abb.22: vereinfachte 2D-Modell

Probenradius  $R1$

Rollenradius  $R2$

$$R3 = R1 + R2 \quad (Gl.9)$$

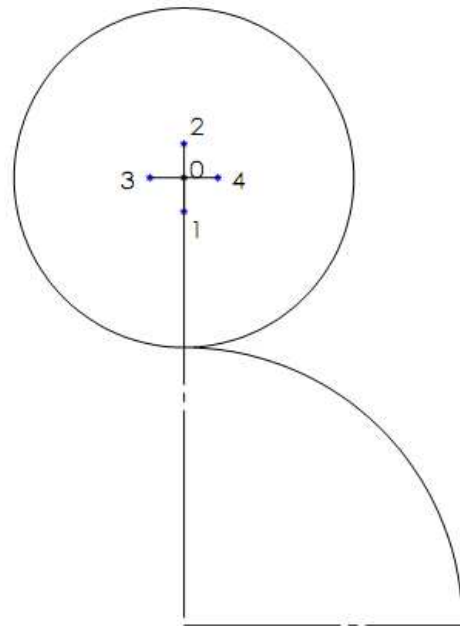


Abb.23: gewählte 5 Steuerknoten

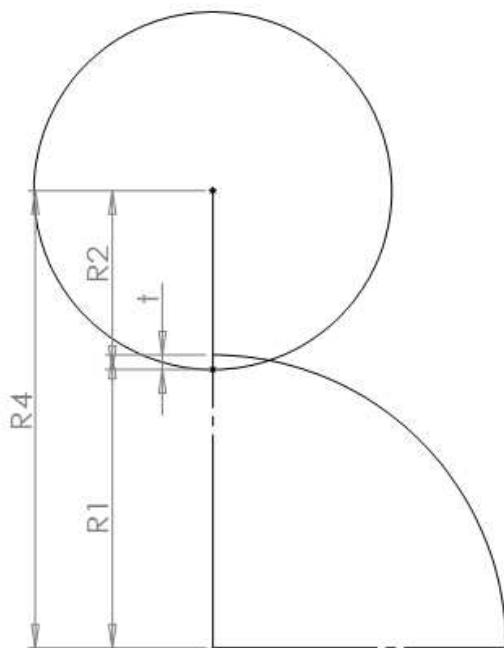
Distanz zwischen 0 und 1 =  $rr$

Distanz zwischen 0 und 2 =  $rr$

Distanz zwischen 0 und 3 =  $rr$

Distanz zwischen 0 und 4 =  $rr$

### 6.3.1 Erste Bewegung: Eindringen



$$R4 = R1 + R2 - t \quad (Gl.10)$$

Abb.24: Die Walzrolle dringt in die Probe

### • Verschiebung von Knoten 0

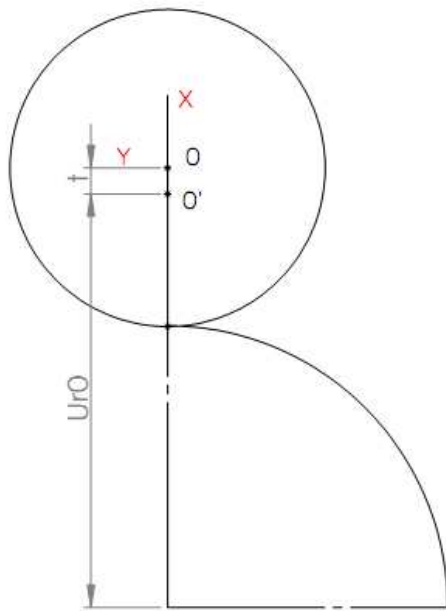


Abb.25: Die Bewegung von Knoten 0 im 1.Schritt

(X - und Y - Achse gehören zum Knotenkoordinatensystem in Abb.25.)

#### **Parameter:**

$$Ur0=R4$$

#### **Verschiebungswerte:**

In X-Achse:  $UX = Ur0-R3 = -t$  (Gl.11)

In Y-Achse:  $UY = 0$

Die Verschiebung von Knoten 1 und 2 sind gleich wie die Verschiebung des Knoten 0, damit können die Abbildungen ausgelassen werden.

### • Verschiebung von Knoten 1

#### **Parameter:**

$$Ur1=R4-rr$$

#### **Verschiebungswerte:**

In X-Achse:  $UX = Ur1-(R3-rr) = -t$  (Gl.12)

In Y-Achse:  $UY = 0$

### • Verschiebung von Knoten 2

#### **Parameter:**

$$Ur2=R4+rr$$

#### **Verschiebungswerte:**

In X-Achse:  $UX = Ur2-(R3+rr) = -t$  (Gl.3)

In Y-Achse:  $UY = 0$



- Verschiebung von Knoten 3

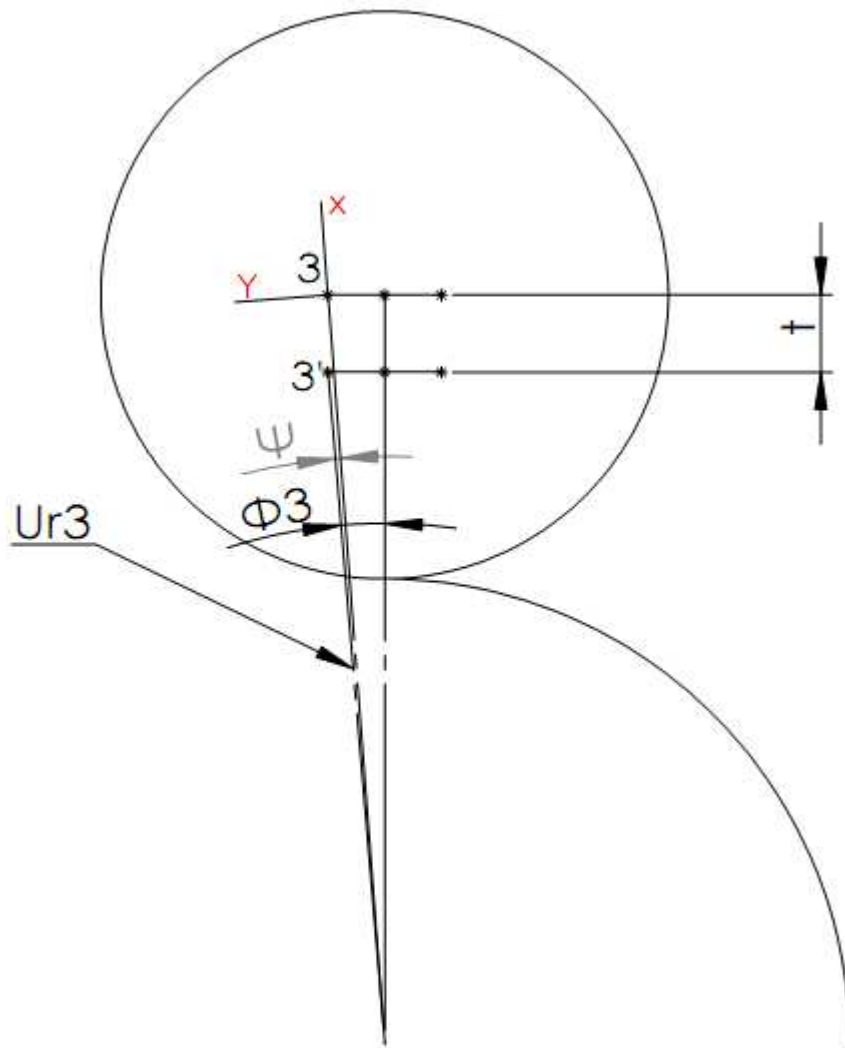


Abb.26

**Parameter:**

$$\Psi = \arctan(rr/R4) - \arctan(rr/R3) \quad (Gl.14)$$

$$Ur3 = \sqrt{rr^2 + R4^2} \quad (Gl.15)$$

**Verschiebungswerte:**

In X-Achse:  $UX = Ur3 \cdot \cos \Psi - \sqrt{rr^2 + R3^2} \quad (Gl.16)$

In Y-Achse:  $UY = Ur3 \cdot \sin \Psi \quad (Gl.7)$

- Verschiebung von Knoten 4

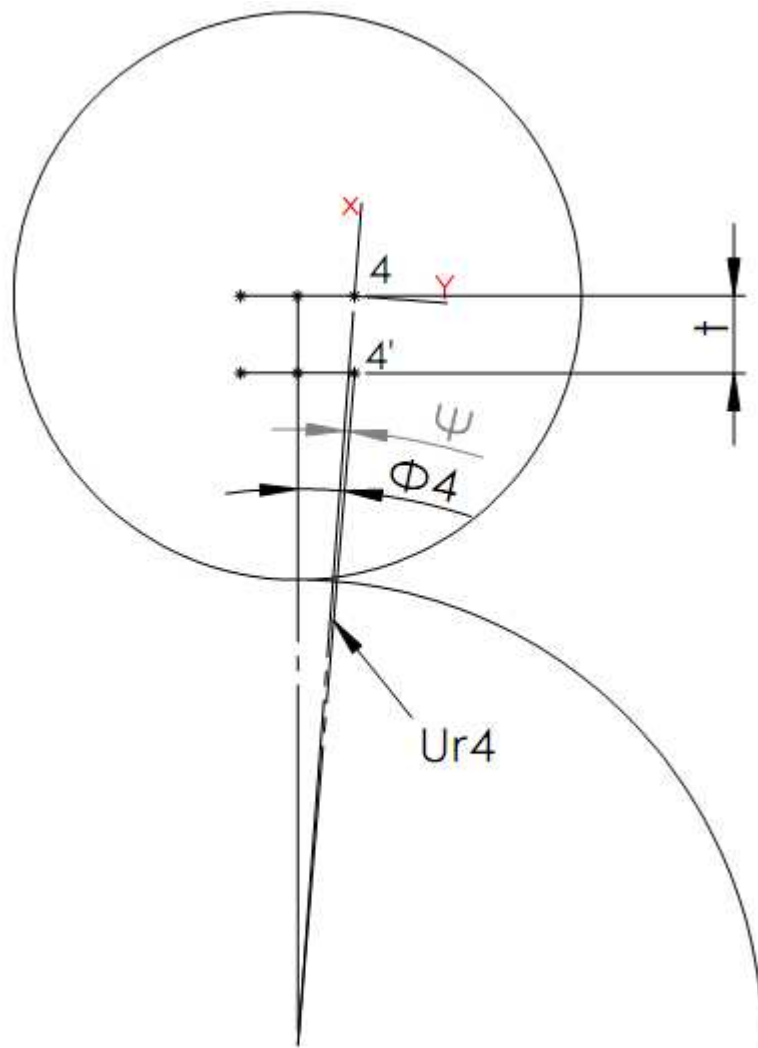


Abb.27

**Parameter:**

$\psi$  ist gleich wie (Gl.14)

$Ur4$  ist gleich wie (Gl.15)

**Verschiebungswerte:**

In X-Achse:  $UX$  ist gleich wie (Gl.16)

In Y-Achse:  $UY$  ist gleich wie (Gl.17)

### 6.3.2 Zweite Bewegung: Abrollen

- Verschiebung von Knoten 0

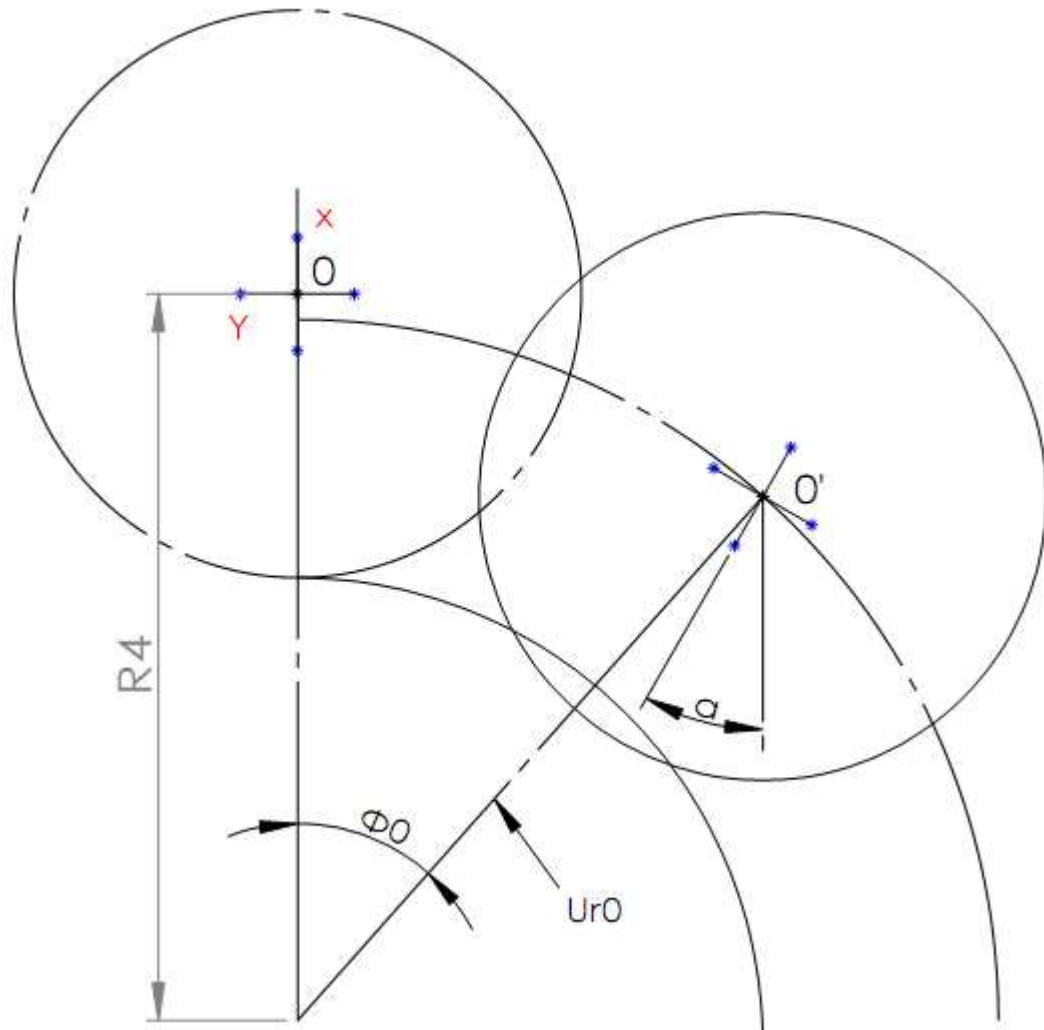


Abb.28

**Parameter:**

$$\Phi_0 = \Phi_{Ink} \cdot k \quad (Gl.18)$$

$$\alpha = (R_4 - R_2) \cdot \Phi_0 / R_2 \quad (Gl.19)$$

$$Ur_0 = R_4$$

**Verschiebungswerte:**

In X-Achse:  $UX = Ur_0 \cdot \cos(\Phi_0) - R_3 \quad (Gl.20)$

In Y-Achse:  $UY = -Ur_0 \cdot \sin(\Phi_0) \quad (Gl.21)$

• Verschiebung von Knoten 1

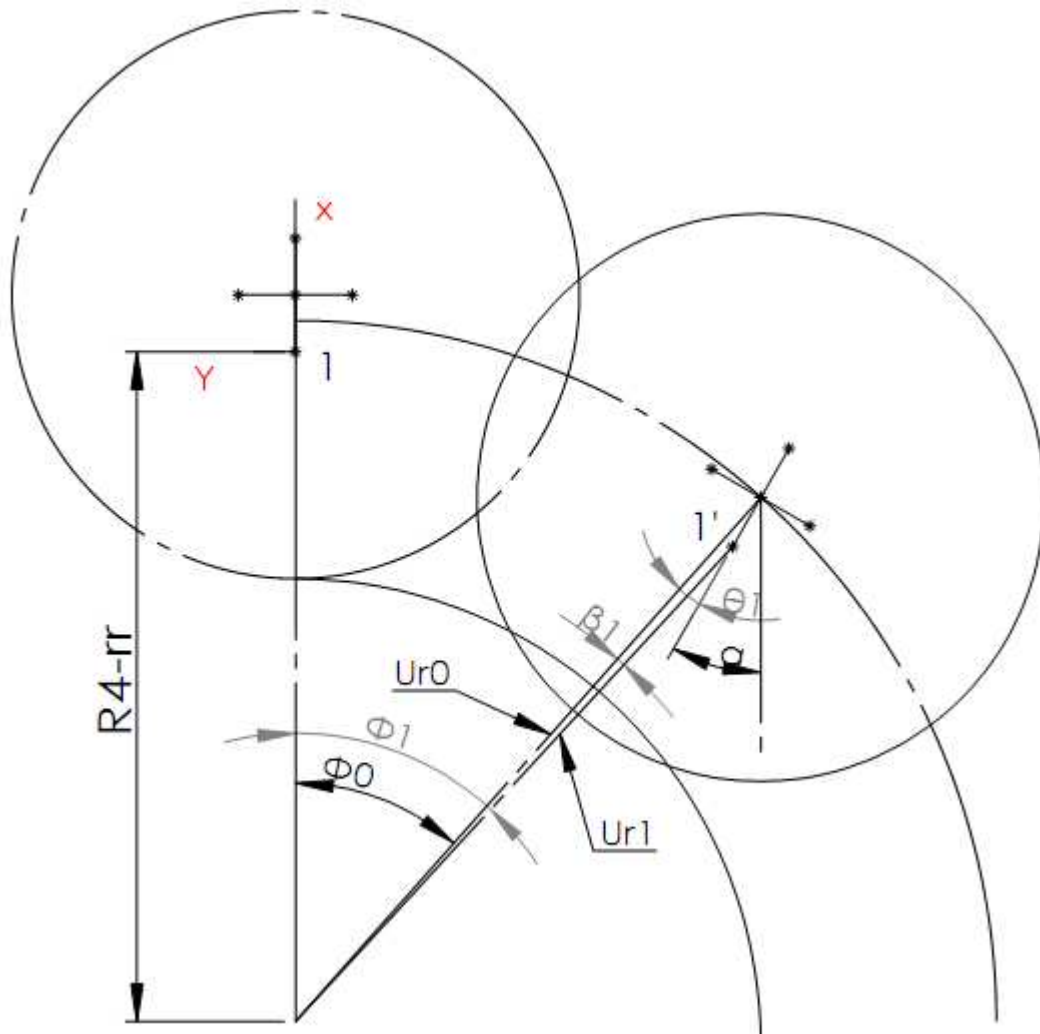


Abb.29

**Parameter:**

$$\theta_1 = \Phi_0 - \alpha \quad (\text{Gl.22})$$

$$Ur1 = \sqrt{rr^2 + Ur0^2 - 2 \cdot rr \cdot Ur0 \cdot \cos(\theta_1)} \quad (\text{Gl.23})$$

$$\beta_1 = \arccos\left(\frac{Ur1^2 + Ur0^2 - rr^2}{2 \cdot Ur1 \cdot Ur0}\right) \quad (\text{Gl.24})$$

$$\Phi_1 = \Phi_0 - \beta_1 \quad (\text{Gl.25})$$

**Verschiebungswerte:**

In X-Achse:  $UX = Ur1 \cdot \cos(\Phi_1) - (R3 - rr)$  (Gl.26)

In Y-Achse:  $UY = -Ur1 \cdot \sin(\Phi_1)$  (Gl.27)

• Verschiebung von Knoten 2

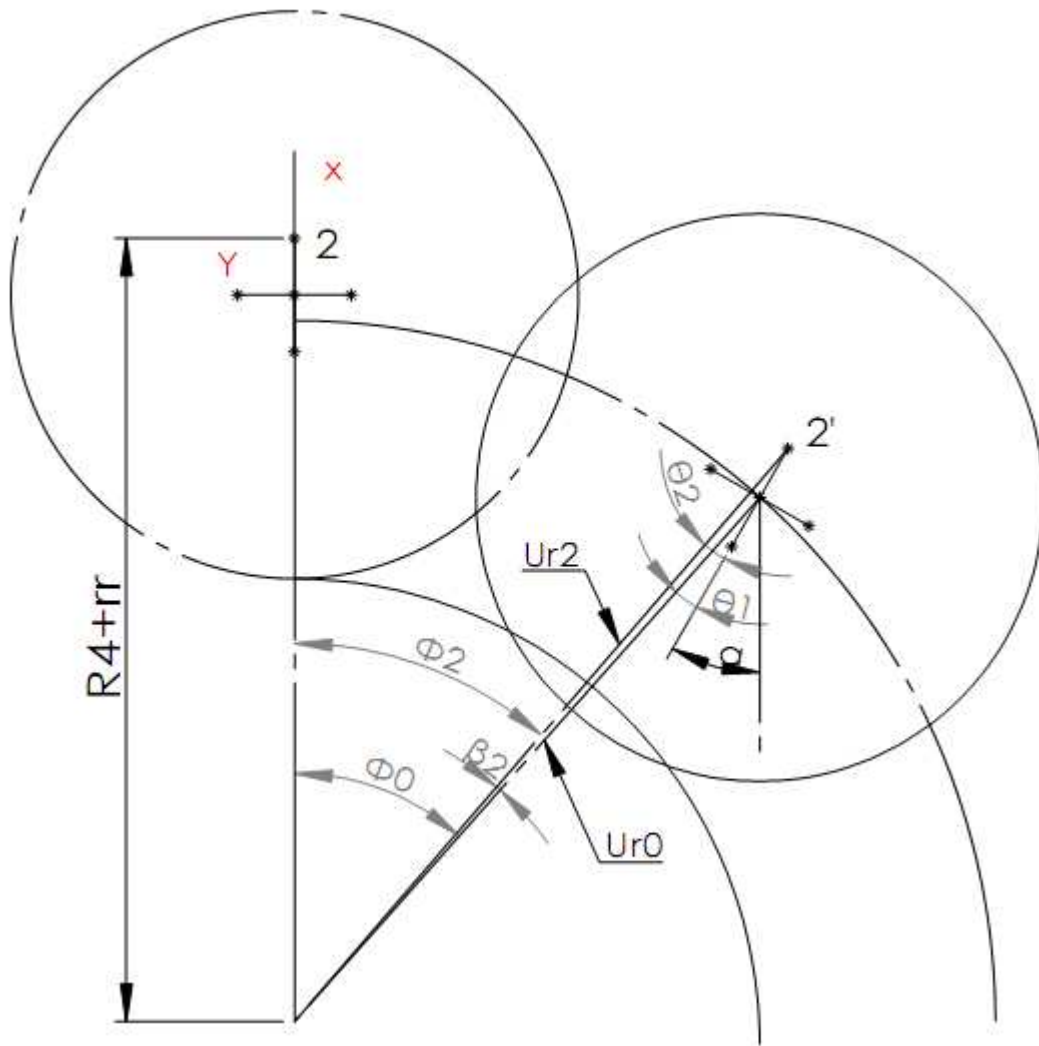


Abb.30

**Parameter:**

$$\theta_2 = 180^\circ - \theta_1 \quad (\text{Gl.28})$$

$$Ur2 = \sqrt{rr^2 + Ur0^2 - 2 \cdot rr \cdot Ur0 \cdot \cos(\theta_2)} \quad (\text{Gl.29})$$

$$\beta_2 = \arccos\left(\frac{Ur2^2 + Ur0^2 - rr^2}{2 \cdot Ur2 \cdot Ur0}\right) \quad (\text{Gl.30})$$

$$\Phi_2 = \Phi_0 + \beta_2 \quad (\text{Gl.31})$$

**Verschiebungswerte:**

In X-Achse:  $UX = Ur2 \cdot \cos(\Phi_2) - (R3 + rr)$  (Gl.32)

In Y-Achse:  $UY = -Ur2 \cdot \sin(\Phi_2)$  (Gl.33)

• Verschiebung von Knoten 3

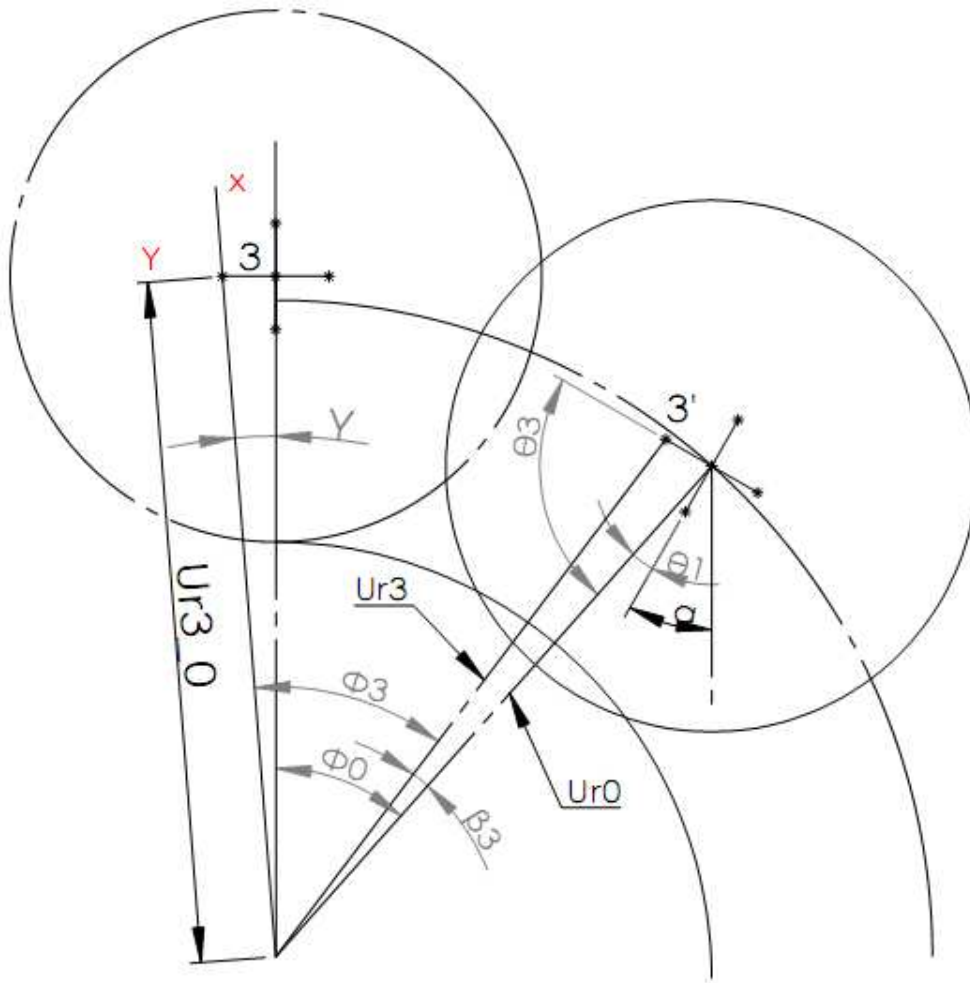


Abb.31

**Parameter:**

$$\theta_3 = 90^\circ - \theta_1 \quad (\text{Gl.34})$$

$$Ur3\_0 = \sqrt{rr^2 + R3^2} \quad (\text{Gl.35})$$

$$Ur3 = \sqrt{rr^2 + Ur0^2 - 2 \cdot rr \cdot Ur0 \cdot \cos(\theta_3)} \quad (\text{Gl.36})$$

$$\beta_3 = \arccos\left(\frac{Ur3^2 + Ur0^2 - rr^2}{2 \cdot Ur3 \cdot Ur0}\right) \quad (\text{Gl.37})$$

$$\gamma = \arctan\left(\frac{rr}{R3}\right) \quad (\text{Gl.38})$$

$$\Phi_3 = \Phi_0 - \beta_3 + \gamma \quad (\text{Gl.39})$$

**Verschiebungswerte:**

In X-Achse:  $UX = Ur3 \cdot \cos(\Phi_3) - Ur3\_0 \quad (\text{Gl.40})$

In Y-Achse:  $UY = -Ur3 \cdot \sin(\Phi_3) \quad (\text{Gl.41})$

• Verschiebung von Knoten 4

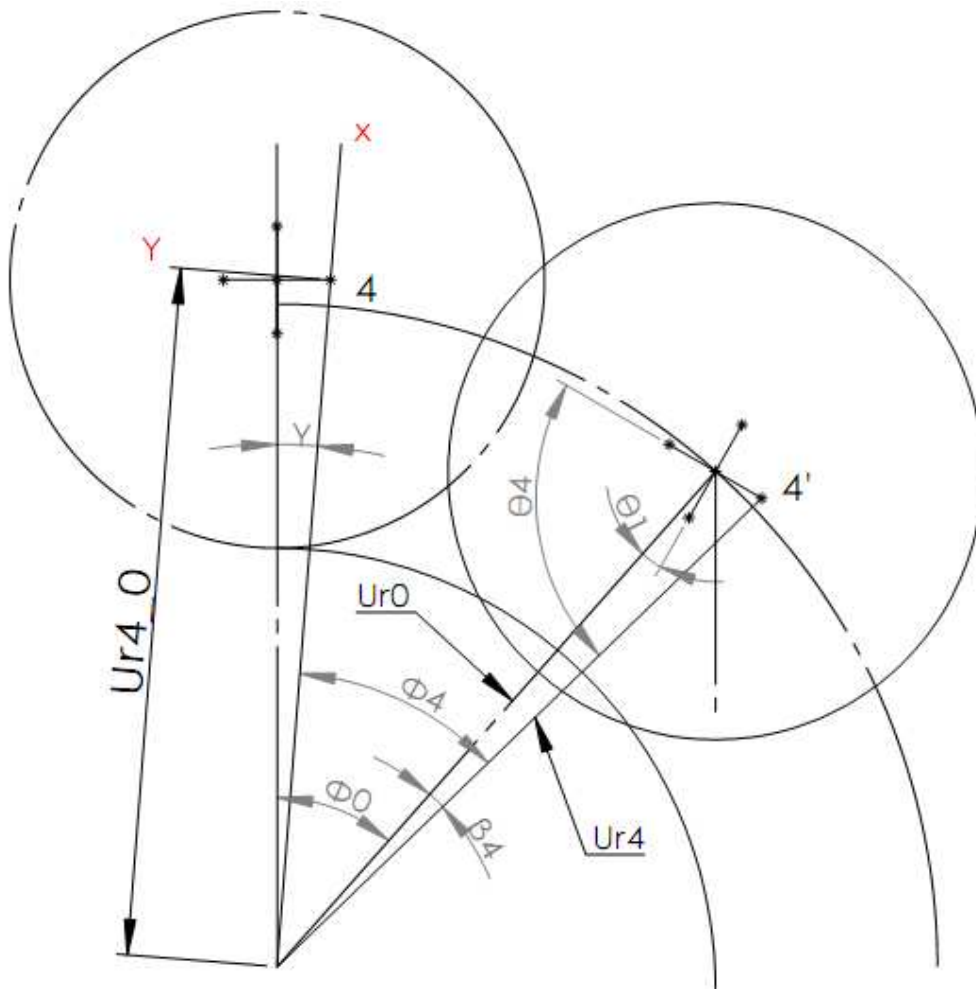


Abb.32

**Parameter:**

$$\theta_4 = 90^\circ + \theta_1 \quad (\text{Gl.42})$$

$$Ur_{4\_0} = \sqrt{rr^2 + R3^2} \quad (\text{Gl.43})$$

$$Ur_4 = \sqrt{rr^2 + Ur_0^2 - 2 \cdot rr \cdot Ur_0 \cdot \cos(\theta_4)} \quad (\text{Gl.44})$$

$$\beta_4 = \arccos\left(\frac{Ur_4^2 + Ur_0^2 - rr^2}{2 \cdot Ur_4 \cdot Ur_0}\right) \quad (\text{Gl.45})$$

$$\gamma = \arctan\left(\frac{rr}{R3}\right) \quad (\text{Gl.46})$$

$$\phi_4 = \phi_0 + \beta_4 - \gamma \quad (\text{Gl.47})$$

**Verschiebungswerte:**

In X-Achse:  $UX = Ur_4 \cdot \cos(\phi_4) - Ur_{4\_0} \quad (\text{Gl.48})$

In Y-Achse:  $UY = -Ur_4 \cdot \sin(\phi_4) \quad (\text{Gl.49})$

### 6.3.3 Letzte Bewegung: Verlassen

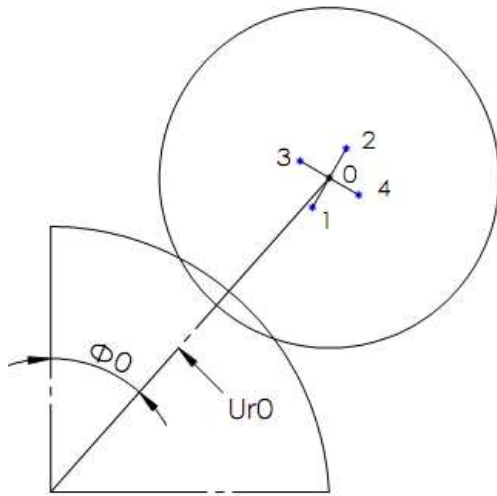


Abb.33: Letzter Schritt der Abrollbewegung

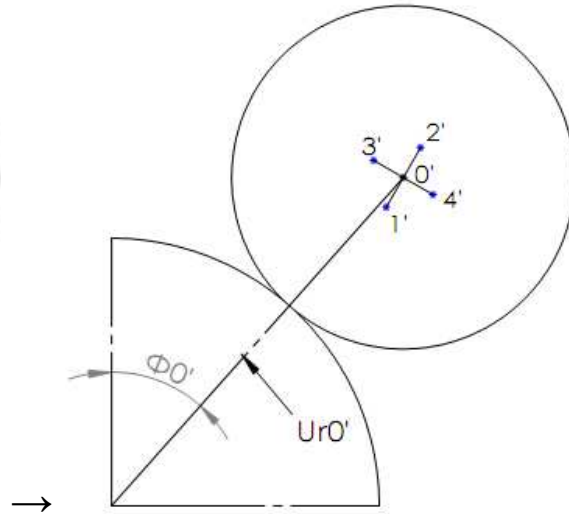


Abb.34: Rolle weg von der Probe

- In dieser Bewegung gibt es nur einen Schritt. Die Werte der Parameter ( $\Phi_0$ ,  $\alpha$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ ,  $\theta_4$ ) bleiben wie die Werte im letzten Schritt der Abrollbewegung.
- Da sich der Wert von  $Ur_0$  verändert, werden die restlichen Parameter neu bestimmt. Die Gleichungen für die Berechnung der neuen Werte sind gleich wie die in der Abrollbewegung.

**Für Knoten 0:** In X-Achse:  $UX = Ur_0' \cdot \cos(\Phi_0) - R_3$  (Gl.50)

In Y-Achse:  $UY = -Ur_0' \cdot \sin(\Phi_0)$  (Gl.51)

**Für Knoten 1:** In X-Achse:  $UX = Ur_1' \cdot \cos(\Phi_1) - (R_3 - rr)$  (Gl.52)

In Y-Achse:  $UY = -Ur_1' \cdot \sin(\Phi_1)$  (Gl.53)

**Für Knoten 2:** In X-Achse:  $UX = Ur_2' \cdot \cos(\Phi_2) - (R_3 + rr)$  (Gl.54)

In Y-Achse:  $UY = -Ur_2' \cdot \sin(\Phi_2)$  (Gl.55)

**Für Knoten 3:** In X-Achse:  $UX = Ur_3' \cdot \cos(\Phi_3) - Ur_{3\_0}$  (Gl.56)

In Y-Achse:  $UY = -Ur_3' \cdot \sin(\Phi_3)$  (Gl.57)

**Für Knoten 4:** In X-Achse:  $UX = Ur_4' \cdot \cos(\Phi_4) - Ur_{4\_0}$  (Gl.58)

In Y-Achse:  $UY = -Ur_4' \cdot \sin(\Phi_4)$  (Gl.59)



## 6.4 Bewegungsrechnungen für 3D-Modell

Zuerst wird ein lokales zylindrisches Koordinatensystem (CS12) in der Mitte der Probe erstellt. Dann werden fünf neue Knoten ausgewählt, welche in der XY-Ebene von CS12 bleiben.

Die Gleichungen für die zeitabhängigen Randbedingungen aus 2D-Schnittmodell müssen nur auf die "neuen" Knoten übertragen werden.

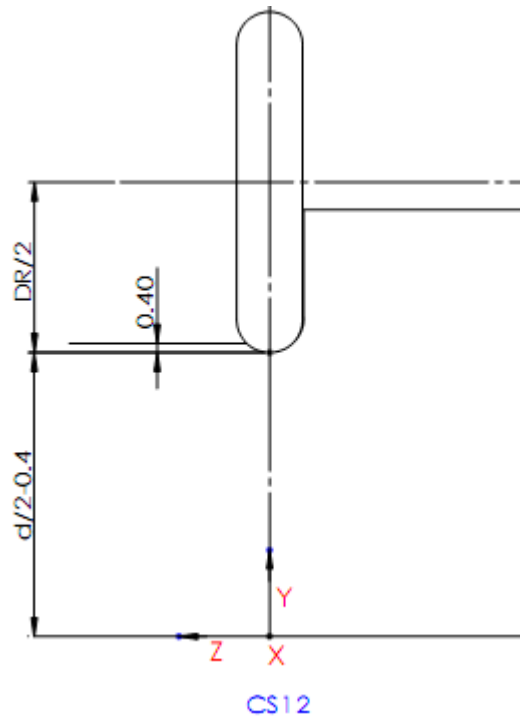


Abb.35: Position von CS12

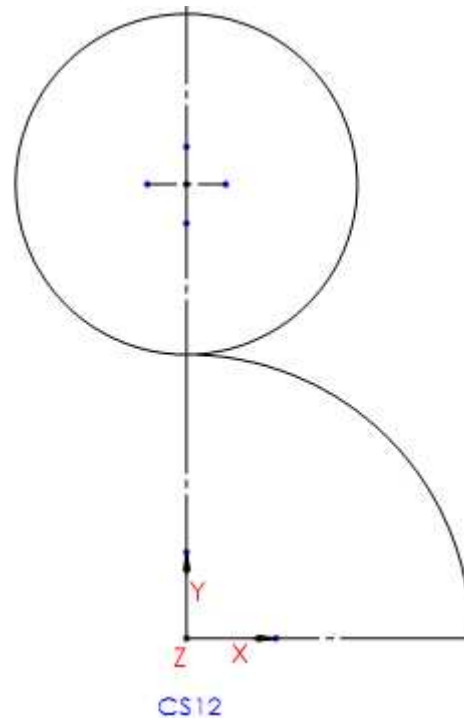


Abb.36: Schnittfläche in XY-Ebene von CS12

### Nummer der neuen Knoten:

Knoten 2439 ersetzt Knoten 0

Knoten 2444 ersetzt Knoten 1

Knoten 3049 ersetzt Knoten 2

Knoten 3583 ersetzt Knoten 3

Knoten 2449 ersetzt Knoten 4

### Definition der Parameter im 3D-Modell:

$R1 = d/2 - 0.4$

$R2 = DR/2$

$rr$  = Distanz zwischen 1925 und 1930(1935,2535 oder 3069)

$\Phi_{Ink} = 5^\circ$

$K = 30^\circ / \Phi_{Ink} = 6$  (6 Schritte in Abrollbewegung)

## 7. Berechnung der Eindringkraft

Wegen der Begrenzung einiger Funktionen in ANSYS, wird die Eindringkraft nicht direkt an die Rolle übertragen. Aber durch die gegebene Verschiebung an die Rolle kann der gleiche Effekt erzielt werden. Deshalb muss die Beziehung zwischen [Eindringkraft](#) und [Eindringtiefe](#) bekannt sein.

### • Summation der Kontaktkräfte:

Da die Verschiebungsrandbedingungen an den fünf Knoten gegeben sind, müssen nur die Reaktionskräfte gemessen werden. Danach kann die gesamte Reaktionskraft berechnet werden. Die gesamte Reaktionskraft in Y-Richtung vom originalen Koordinatensystem (CS 0) ist gleich der Eindringkraft.

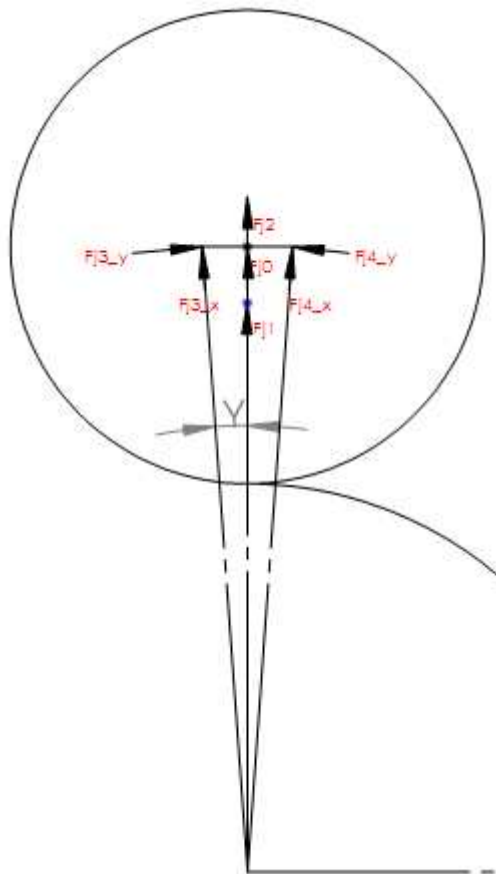


Abb.37: Reaktionskräfte

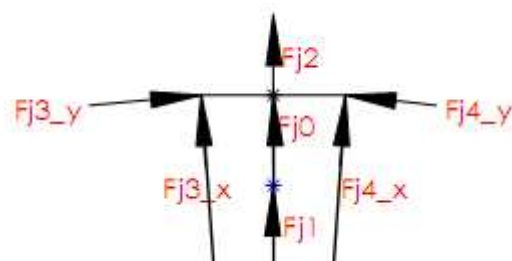


Abb.38

### **Eindringskraft:**

$$FR = (Fj0 + Fj1 + Fj2 + Fj3\_x \cdot \cos\gamma + Fj4\_x \cdot \cos\gamma + Fj3\_y \cdot \sin\gamma + Fj4\_y \cdot \sin\gamma) \cdot 2 / 1000 \quad (Gl. 60)$$

### • Vermessung der Y-Verschiebungen:

Ein Knoten aus der Rolle wird gewählt. Mit dem Befehl “\*get” kann die Y-Verschiebung vom Knoten gemessen werden.

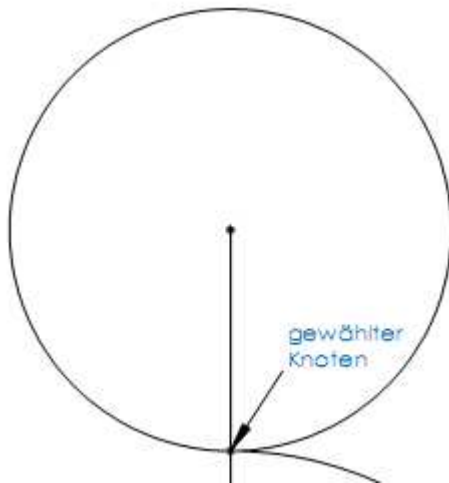


Abb.39

### • Daten ausgeben

Mit einem Post-Processing-Programm kann die Daten in einem Vektor gespeichert und als Textdatei ausgegeben werden. Diese Textdaten können in Excel verarbeitet werden.

Mit verschiedenen Parametern ergeben sich unterschiedliche Verläufe der Eindringkraft über der Eindringtiefe.

z.B für [d1](#), [R1](#), [EN GJS-800-8](#)

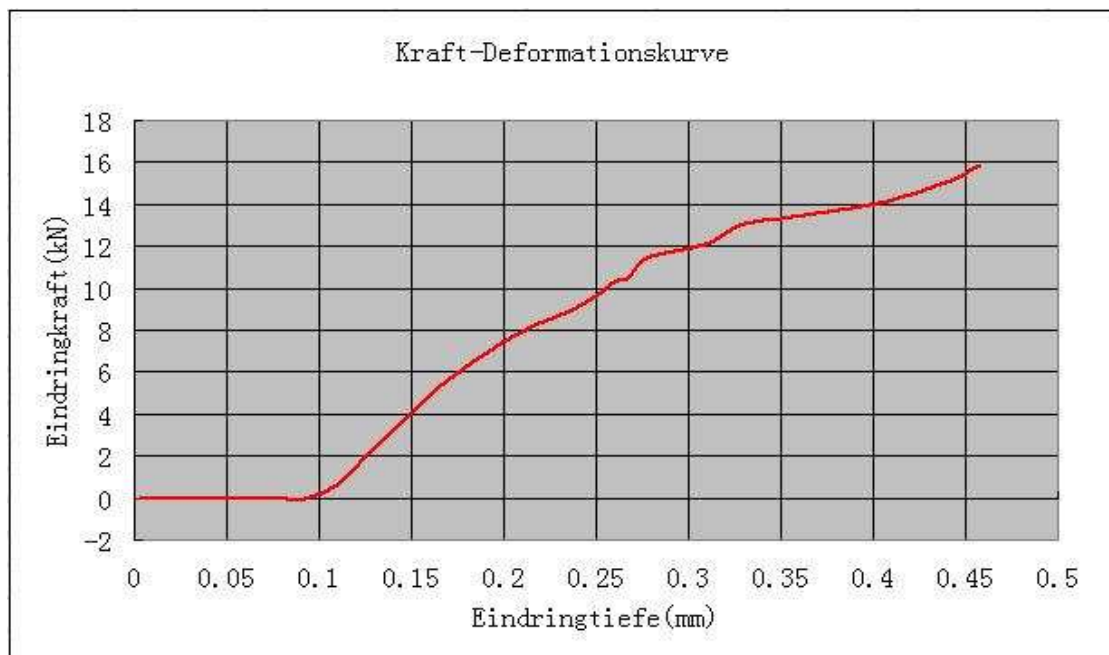


Abb.40

für d1, R1, EN GJS-1000-5



Abb.41

### • Gebrauchte Daten auswählen

Tabelle 5 : EN GJS-800-8

	Fw1	Fw2	Fw3	Fw4
D1,R1	t=0.175	t=0.212	t=0.255	t=0.300
D1,R2	t=0.165	t=0.195	t=0.230	t=0.260
D2,R1	t=0.170	t=0.200	t=0.225	t=0.270
D2,R2	t=0.165	t=0.180	t=0.210	t=0.240

Tabelle 6 : EN GJS-1000-5

	Fw1	Fw2	Fw3	Fw4
D1,R1	t=0.170	t=0.200	t=0.225	t=0.265
D1,R2	t=0.162	t=0.180	t=0.210	t=0.230
D2,R1	t=0.165	t=0.191	t=0.210	t=0.230
D2,R2	t=0.162	t=0.182	t=0.205	t=0.210

## 8. Vermessung der Eigenspannungen

### 8.1 Aufgabe 1

Um den Effekt des Festwalzprozesses aufzuzeigen, sollen die Spannungen für alle Beanspruchungsfälle beim Abrollvorgang bis  $30^\circ$  an der Oberfläche der Kerbe gemessen werden. Die Spannungen, die nach dem Verlassen der Walzrolle noch in der Probe verbleiben, werden als Eigenspannungen bezeichnet.

#### • Koordinaten für anzuzeigendes Ergebnis

Für die Darstellung günstig der Spannungen und Verformungen ist die Anwendung eines zylindrischen Koordinatensystems günstig. Deshalb kann CS\_12 als Auswertungskoordinatensystem mit dem Befehl "RSYS,11" aktiviert werden.

#### • Zu vermessenden Knoten auswählen

In der XY-Ebene von CS\_12 kann ein zu vermessender Knoten ausgewählt werden. Manchmal ist der gewählte Knoten nicht in XY-Ebene, aber der Fehler des Ergebnisses ist so klein, dass er vernachlässigt werden kann.

Die Position vom gewählten Knoten (GN) im CS\_12 ist  $(d/2-0.4, 75, 0)$ .

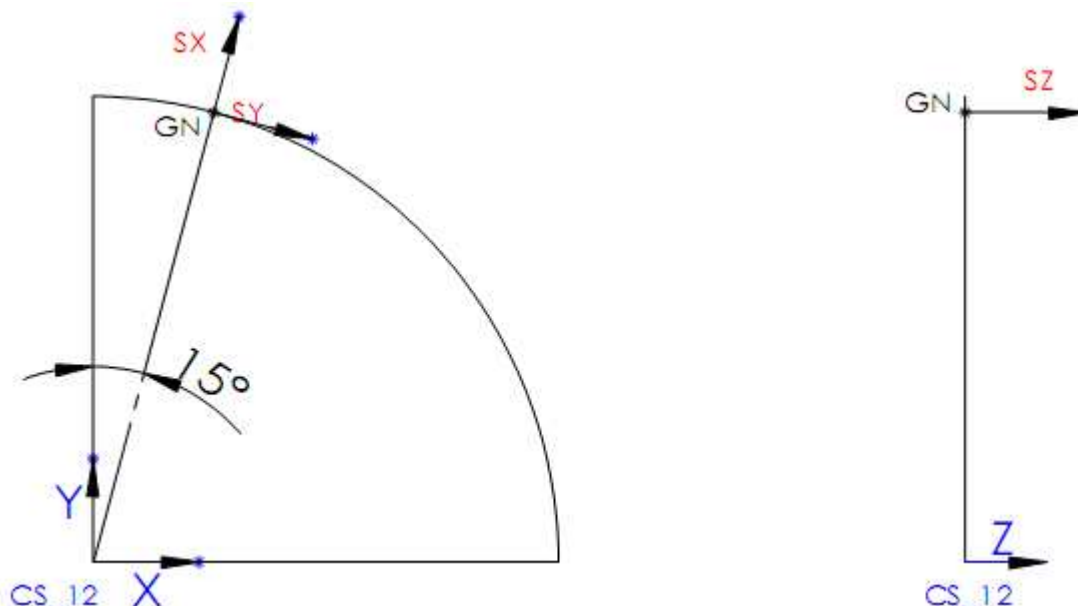


Abb.42: gewählter Knoten und die Spannungsrichtungen

#### • Vermessung der Spannungen

Mit dem Befehl "\*Get" können die Spannungen des Knotens in drei Richtungen bestimmt werden. **SX** ist die **radiale** Spannung, **SY** die **tangential** Spannung und **SZ** die **axiale** Spannung.

## • Daten ausgeben

Die Daten können in Excel verarbeitet werden. Für verschiedene Parameter ergeben sich verschiedene Spannungsverläufe. Es gibt insgesamt 32 Beanspruchungsfälle.

Zum Beispiel:

### Gruppe 1: d1, R1, Fw1, EN GJS-800-8

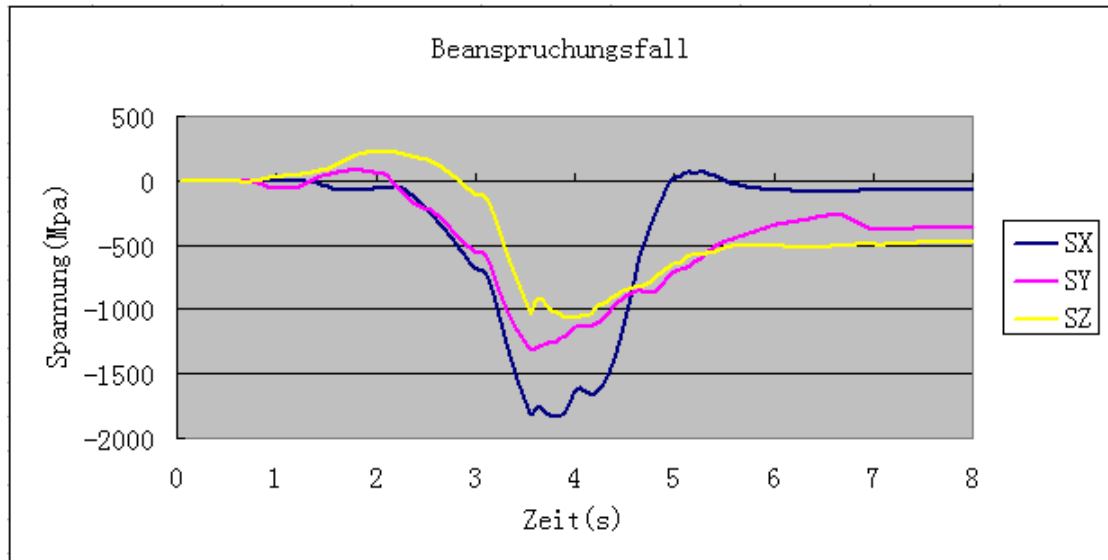


Abb.43

Erklärung für die Zeit-Achse:

0s — 1s	Eindringen
1s — 7s	Abrollen um 30°
7s — 8s	Verlassen

### Gruppe 2: d1, R1, Fw2, EN GJS-800-8

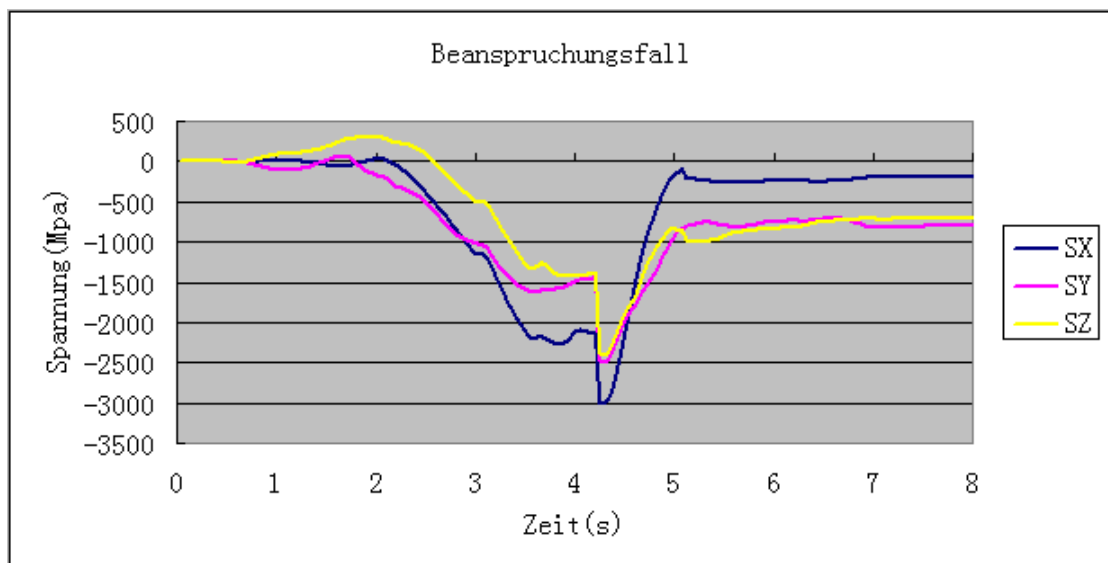


Abb.44

**Gruppe 3: d1, R1, Fw3, EN GJS-800-8**

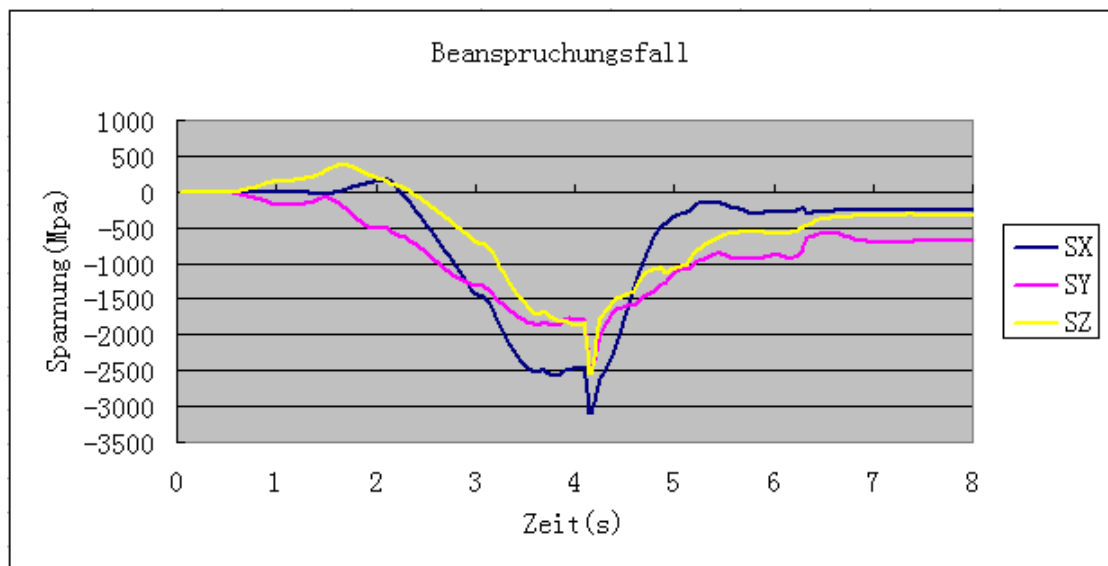


Abb.45

**Gruppe 4: d1, R1, Fw4, EN GJS-800-8**

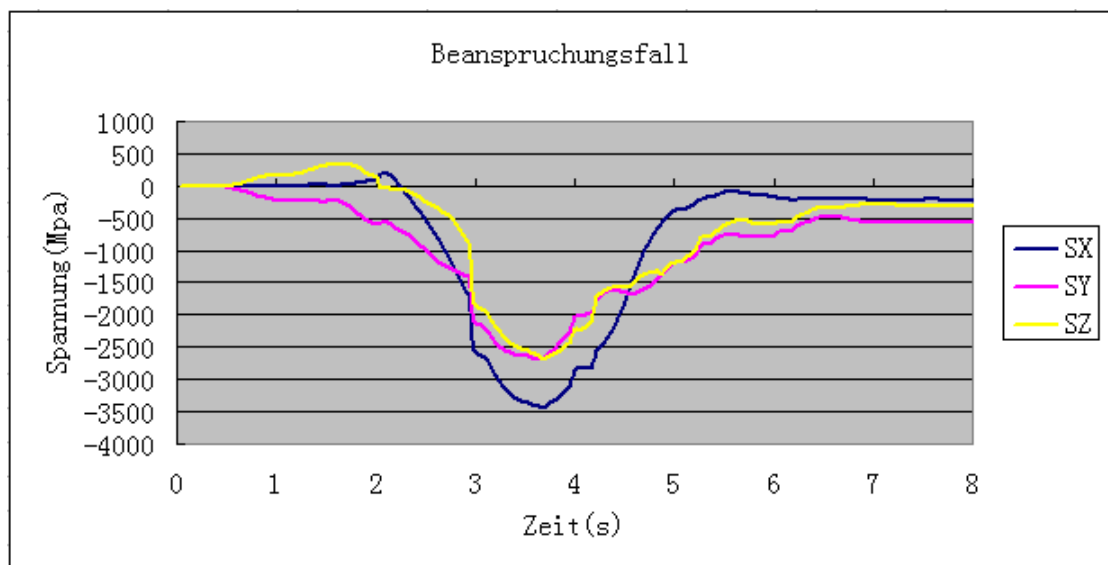


Abb.46

In Tabelle 7 sind die Eigenspannungen für die verschiedenen Beanspruchungsfälle aufgeführt.

Tabelle 7

		<b>SX</b>	<b>SY</b>	<b>SZ</b>
<b>EN GJS -800 -8</b>	<b>d1,R1,Fw1</b>	-70.15	-362.25	-477.13
	<b>d1,R1,Fw2</b>	-197.47	-821.50	-717.21
	<b>d1,R1,Fw3</b>	-256.77	-689.37	-326.58
	<b>d1,R1,Fw4</b>	-220.04	-558.77	-314.79
	<b>d1,R2,Fw1</b>	-50.54	-249.75	-403.26
	<b>d1,R2,Fw2</b>	-39.83	-280.40	-438.51
	<b>d1,R2,Fw3</b>	-44.31	-305.82	-278.23
	<b>d1,R2,Fw4</b>	-75.62	-534.16	-256.45
	<b>d2,R1,Fw1</b>	-146.06	-458.20	-612.94
	<b>d2,R1,Fw2</b>	-236.03	-592.44	-739.40
	<b>d2,R1,Fw3</b>	-333.80	-712.73	-723.75
	<b>d2,R1,Fw4</b>	-222.19	-530.20	-590.10
	<b>d2,R2,Fw1</b>	-88.57	-402.16	-540.35
	<b>d2,R2,Fw2</b>	-101.12	-375.61	-580.06
	<b>d2,R2,Fw3</b>	-181.01	-462.32	-677.04
	<b>d2,R2,Fw4</b>	-180.50	-586.61	-554.91
<b>EN GJS -100 0-5</b>	<b>d1,R1,Fw1</b>	-85.29	-419.92	-533.37
	<b>d1,R1,Fw2</b>	70.17	-382.28	-492.73
	<b>d1,R1,Fw3</b>	-75.85	-662.48	-575.14
	<b>d1,R1,Fw4</b>	-166.73	-821.33	-539.00
	<b>d1,R2,Fw1</b>	-71.58	-307.13	-452.99
	<b>d1,R2,Fw2</b>	-82.20	-233.70	-541.11
	<b>d1,R2,Fw3</b>	-42.31	-260.82	-520.20
	<b>d1,R2,Fw4</b>	-53.12	-523.87	-587.41
	<b>d2,R1,Fw1</b>	-128.53	-575.37	-653.44
	<b>d2,R1,Fw2</b>	-326.00	-890.67	-1092.73
	<b>d2,R1,Fw3</b>	-202.07	-637.12	-889.43
	<b>d2,R1,Fw4</b>	50.75	-462.13	-609.02
	<b>d2,R2,Fw1</b>	-64.23	-453.88	-546.31
	<b>d2,R2,Fw2</b>	-96.14	-495.69	-669.88
	<b>d2,R2,Fw3</b>	-241.07	-706.51	-951.92
	<b>d2,R2,Fw4</b>	-245.87	-697.50	-957.42



## 8.2 Aufgabe 2

Tiefenprofil für Beanspruchungsfälle an einer Probenstelle bei 20°.

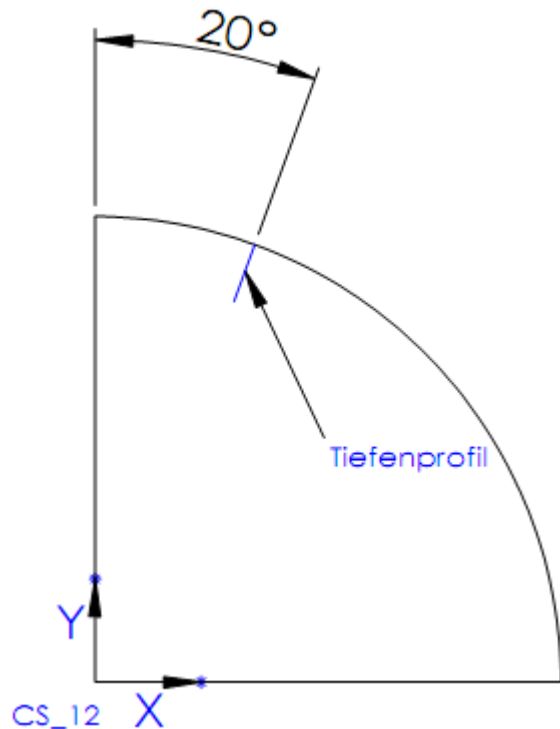


Abb.47: Tiefenprofil

Nach einer feineren Verneztung der Probe können mehr Knoten für das Erstellen eines Tiefenprofils der entstandenen Druckeigenspannungen verwendet werden. Die Daten wurden in Excel verarbeitet.

Mit den Ergebnissen der acht Beanspruchungsfälle können die Effekte des Festwalzprozesses bei verschiedenen Parametern miteinander verglichen werden.

### Fall 1: d1, R1, Fw2, EN GJS-800-8

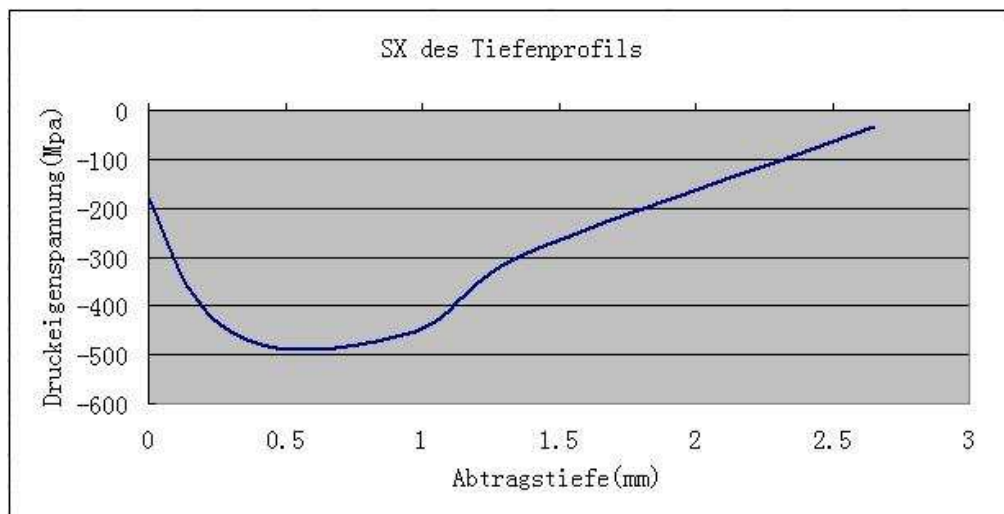


Abb.48

**Fall 2: d1, R2, Fw2, EN GJS-800-8**

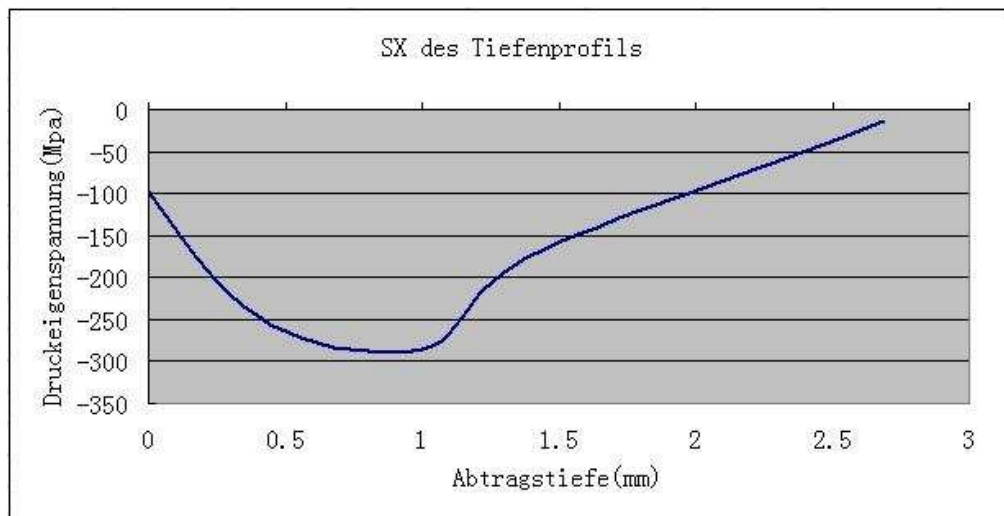


Abb.49

**Fall 3: d2, R1, Fw2, EN GJS-800-8**

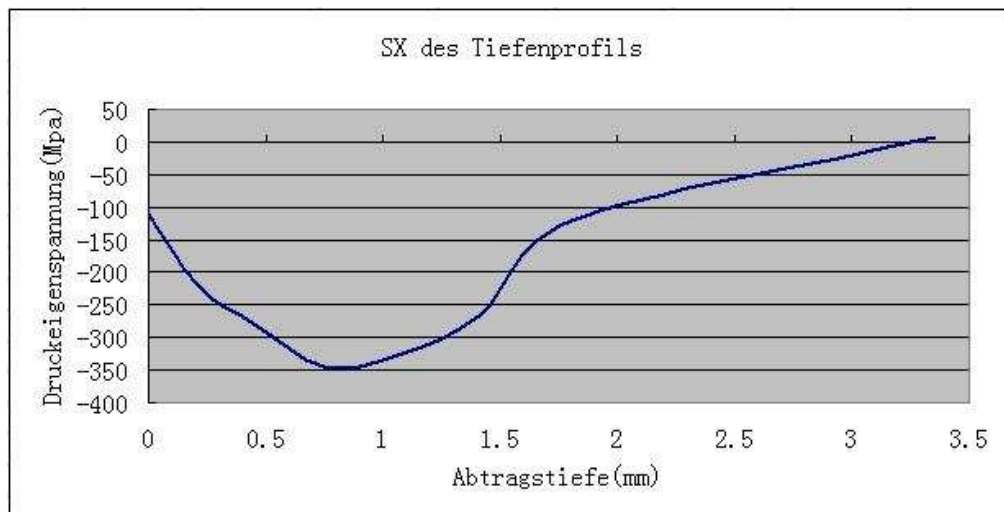


Abb.50

**Fall 4: d2, R2, Fw2, EN GJS-800-8**

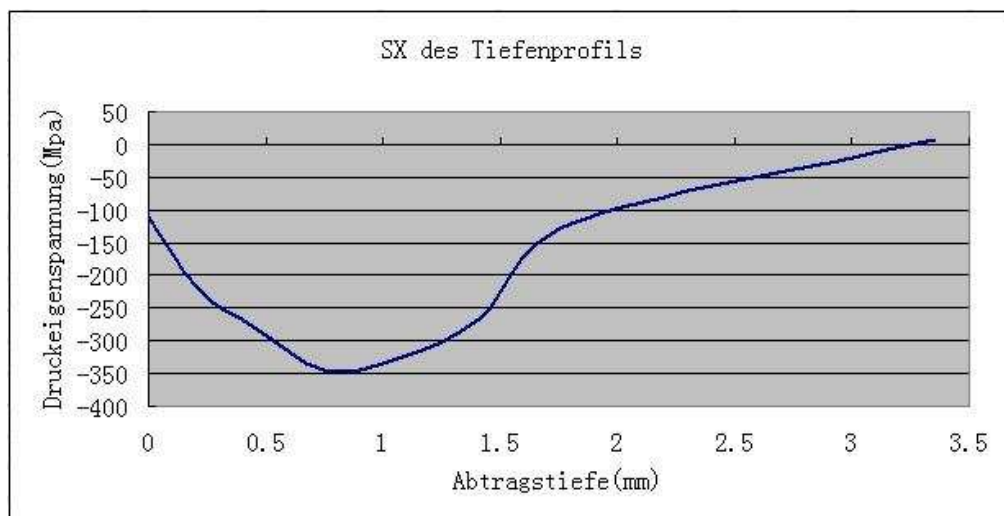


Abb.51

**Fall 5: d1, R2, Fw1, EN GJS-800-8**

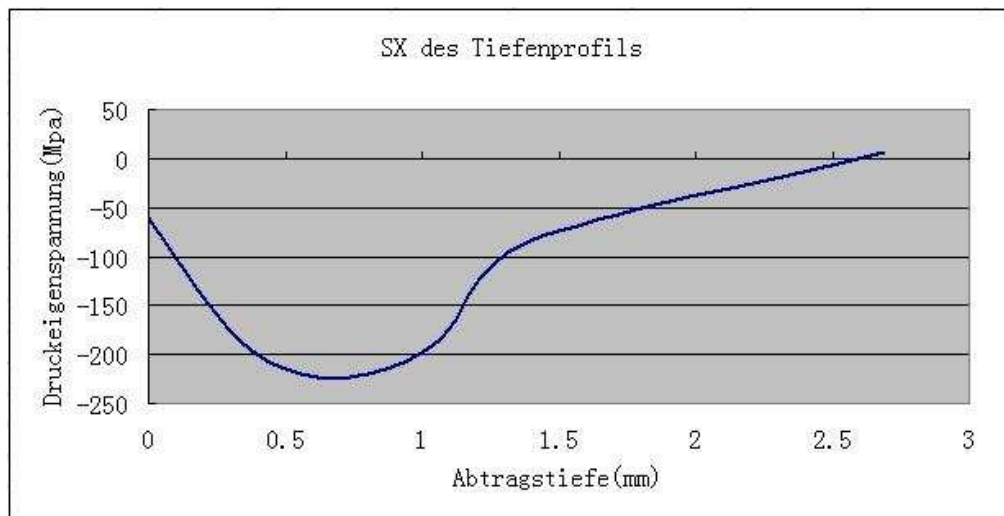


Abb.52

**Fall 6: d1, R2, Fw3, EN GJS-800-8**

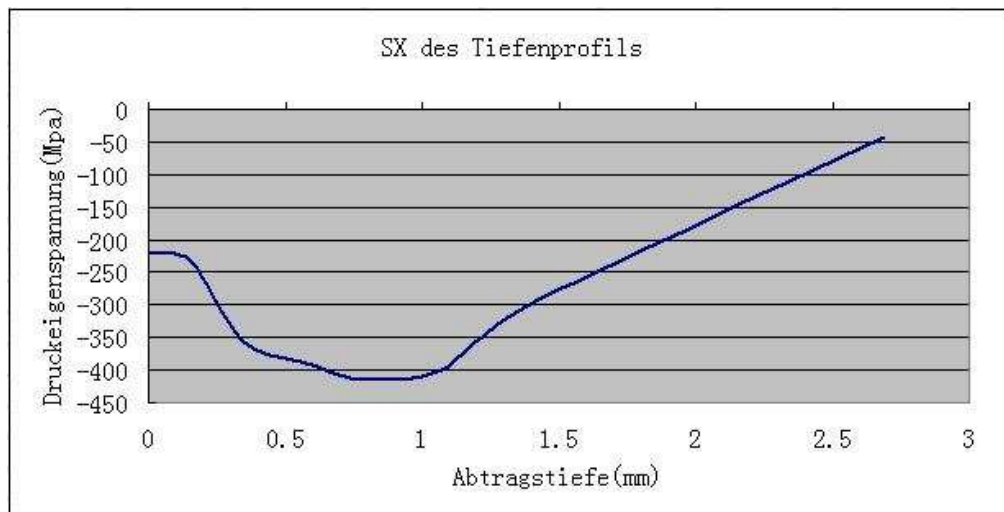


Abb.53

**Fall 7: d1, R2, Fw4, EN GJS-800-8**

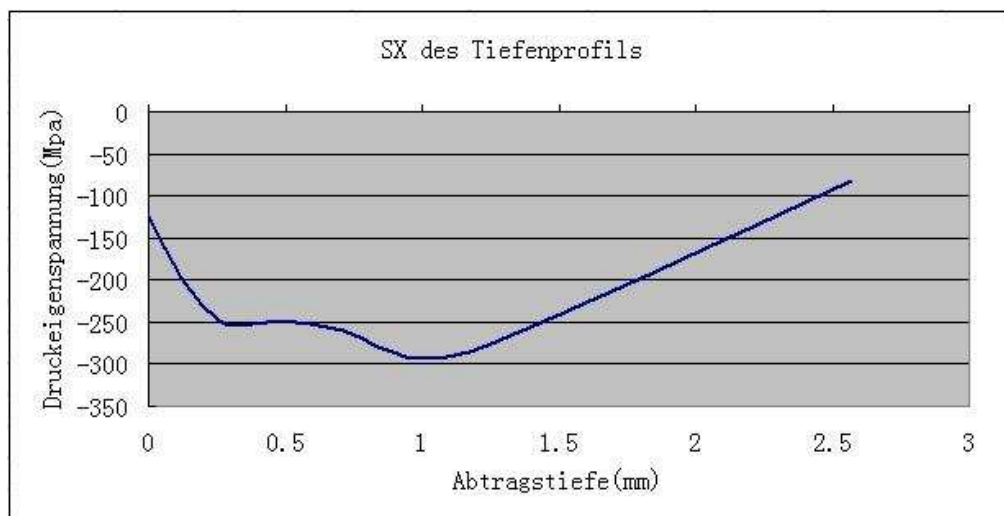


Abb.54

Fall 8: d1, R2, Fw2, **EN GJS-1000-5**

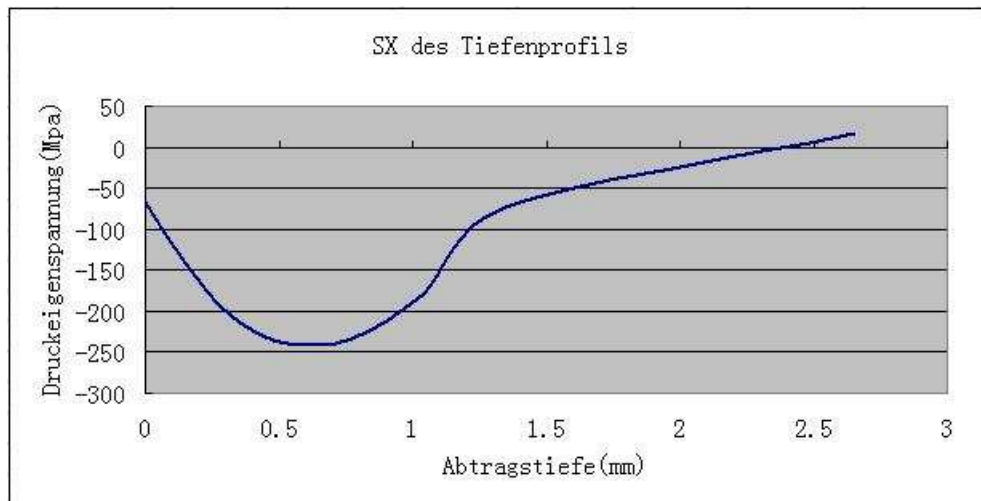


Abb.55

## II Das ANSYS - Modell

```
!-----
FINI
/CLE
/FILNAME,Festwalz
/TITLE,FEM-Simulation des Festwalzprozesses
/PREP7                                ! Pre-Processing
!=====PARAMETER=====
PI=ACOS(-1)

!Konstruktive Parameter
d=25          !Probendurchmesser: d1=25mm, d2=30mm ,d3=35mm
R=1.5         !Radius: R1=1,1mm R2=1,5mm

!Festwalzparameter
DR=15         !Rollendurchmesser
rR=1.45       !Profilradius der Walzrolle:   für R1, rR1=1,1mm
              !                               für R2, rR2=1,45mm
t=0.195       ! Eindringtiefe
outres=2

!----- Material -----
/INPUT,ADI_800,inp! ADI_800 und ADI_1000
MP,MU,1,0.15
MP,EX,2,2.1E05                                ! Young's modulus
MP,NUXY,2,0.3                                  ! Poison's Constant
MP,EX,3,2.1E05                                ! E-Modul für Material Nr. 3 (Kontaktelemente)
MP,NUXY,3,0.3                                  ! nu
MP,MU,3,0          ! Reibwert

ET,1,45

! ===== Geometriemodellierung =====
!Probe

b=sqrt(R*R-(R-0.4)*(R-0.4))  !hilfswert

x1=0.1*d
y1=d/2-x1

K,1,2.5*d,d/2
K,2,3.5*d-R-b,d/2
```

**K,3,3.5\*d-R,d/2-0.4**  
**K,4,3.5\*d,d/2-0.4+R**  
**K,5,3.5\*d,1.4\*d/2**  
**K,6,4.5\*d,1.4\*d/2**  
**K,7,4.5\*d,0**  
**K,8,2.5\*d,0**  
**K,9,3.5\*d-R-b,0**  
**K,10,3.5\*d+x1,0**  
**K,11,3.5\*d+x1,d/2-0.4+R**  
**K,12,3.5\*d-R-b,y1**  
**K,13,4.5\*d,d/2-0.4+R**  
**K,14,3.5\*d+x1,1.4\*d/2**  
**K,15,2.5\*d,y1**  
**K,20,3.5\*d-R,d/2-0.4+R**

**LARC,2,3,20,R**  
**LARC,3,4,20,R**  
**LCOMB,1,2**

**A,2,12,11,4**  
**A,12,11,10,9**  
**A,4,5,14,11**  
**A,13,6,14,11**  
**A,11,13,7,10**  
**A,1,2,12,15**  
**A,8,9,12,15**  
**ALLSEL**

**!Walzrolle**

**LOCAL,11,0,3.5\*d-R,d/2-0.4+DR/2,0,-90,0**  
**CSYS,11**  
**K,30,0,0**  
**K,31,0,rR**  
**K,32,DR/2-rR,rR**  
**K,33,DR/2,0**  
**K,34,DR/2-rR,-rR**  
**K,35,0,-rR**  
**K,36,DR/2-rR,0**  
**K,37,DR/2-2\*rR,0**  
**LARC,32,33,36,rR**  
**LARC,33,34,36,rR**  
**LCOMB,21,22**  
**A,31,32,37,30**

A,35,34,37,30

A,32,37,34

!-----Netzung(Probe)-----

EZ1=6

EZ2=4

EZ3=2

EZ4=6

EZ5=4

EZ6=4

EZ7=2

LESIZE,1,,,EZ1

LESIZE,3,,,EZ1,3

LESIZE,6,,,EZ1,1/3

LESIZE,2,,,EZ2

LESIZE,4,,,EZ2

LESIZE,9,,,EZ2

LESIZE,18,,,EZ2

LESIZE,8,,,EZ3,2

LESIZE,10,,,EZ3,1/2

LESIZE,11,,,EZ3,2

LESIZE,5,,,EZ4,1.5

LESIZE,7,,,EZ4,1/1.5

LESIZE,14,,,EZ4,1.5

LESIZE,20,,,EZ4,1.5

LESIZE,12,,,EZ5,1/3

LESIZE,13,,,EZ5,3

LESIZE,15,,,EZ5,1/3

LESIZE,16,,,EZ6,1/3

LESIZE,17,,,EZ6,3

LESIZE,19,,,EZ6,1/3

VROTAT,1,2,3,,,10,7,30

VROTAT,4,5,6,7,,,10,7,30

VROTAT,15,18,22,,,10,7,60

VROTAT,27,30,35,38,,,10,7,60

VGLUE,all

LESIZE,99,,,EZ5,3  
LESIZE,101,,,EZ5,3  
LESIZE,103,,,EZ5,3  
LESIZE,105,,,EZ5,3

LESIZE,100,,,EZ6,3  
LESIZE,102,,,EZ6,3  
LESIZE,104,,,EZ6,3  
LESIZE,106,,,EZ6,3

MAT,1  
type,1  
MSHAPE,0  
MSHKEY,1  
VMESH,all  
ALLSEL

!-----Netzung(Walzrolle)-----  
REZ1=6  
REZ2=6

LESIZE,21,,,REZ1  
LESIZE,24,,,REZ2  
VROTAT,10,9,8,,,,,31,35,360

MAT,2  
type,1  
MSHAPE,0  
MSHKEY,1  
VSEL,all  
VSEL,s,,,4,7,1  
VSEL,a,,,11,14,1  
VSEL,a,,,23,26,1  
VMESH,all

!-----  
WSORT ! Optimierung der Element- und Knotennummern  
!-----

! KONTACT - DEFINITION

MAT,3  
R,3,,,0.5,0.2,0.001,,,,(SIGMAF\*0.577),0.0,1.0,,  
REAL,3  
ET,2,170 ! Target - Elements target170  
ET,3,173 ! Contact



<b>KEYOPT,3,1,</b>	<b>! 1 - only structural contact</b>
<b>KEYOPT,3,2,0</b>	<b>! 2 - Algorithmus: 0 - Penalty function + Lagrange multiplier</b>
<b>KEYOPT,3,3,0</b>	<b>! 3 - Use with h-elements (no superelements)</b>
<b>KEYOPT,3,4,0</b>	<b>! 4 - Location of contact detection point: 0 - Gauss-Point</b>
<b>KEYOPT,3,5,</b>	<b>! 5 - CNOF Automated adjustment</b>
<b>KEYOPT,3,6,</b>	<b>! 6 - Symmetrical stiffness matrix</b>
<b>KEYOPT,3,7,0</b>	<b>! 7 - Element level time inc. control; 0 - No control</b>
<b>KEYOPT,3,8,0</b>	<b>! 8 - Spurious Contact Prevention 0 - no prevention</b>
<b>KEYOPT,3,9,0</b>	<b>! 9 - include both init. - geom. penet. or gap and offset</b>
<b>KEYOPT,3,10,0</b>	<b>!10 - Contact stiffness update: 0 - no update</b>
<b>KEYOPT,3,11,0</b>	<b>!11 - Beam/Shell Thickness Effect: 0 - None</b>
<b>KEYOPT,3,12,0</b>	<b>!12 - Behavior of contact surface: 0 - Standart</b>

**!-----Contact Fläche-----**

```

ALLSEL
ASEL,S,,,26                ! Contact Fläche
NSLA,S,1
ESLN,R,0
TYPE,3
REAL,3
ESURF,ALL
ALLSEL

```

**!-----Target Fläche-----**

```

ALLSEL
ASEL,S,,,14                ! Target Fläche
NSLA,S,1
ESLN,R,0
TYPE,2
REAL,3
ESURF,ALL
ALLSEL

```

**!-----Randbedingungen-----**

```

csys,0
ASEL,S,,,1,7,1
NSLA,S,1
D,ALL,UZ,0
NSEL,S,LOC,X,4.5*d        ! Einspannung der Probe
D,ALL,ux,0
NSEL,S,LOC,Y,0
D,ALL,UY,0
allsel

```

```

!-----
LOCAL,12,1,3.5*d-R,0,0,0,-90
csys,12
NSEL,s,,,2101
NSEL,a,,,2106
NSEL,a,,,2711
NSEL,a,,,2111
NSEL,a,,,3245
NROTAT,all
allsel

finish
!=====
/SOLU
ANTYPE,STATIC

!-----Eindringen-----
TIME,1
rr=DISTND(2101,2106)
R1=d/2-0.4
R2=DR/2
R4=R1+R2-t
R3=R1+R2
Psi=(atan(rr/R4)-atan(rr/R3))*180/pi

D,2101,ux,-t
D,2101,uy,0
D,2101,uz,0
D,2106,ux,-t
D,2106,uy,0
D,2106,uz,0
D,2711,ux,-t
D,2711,uy,0
D,2711,uz,0
D,3245,ux,-(sqrt(rr*rr+R3*R3)-sqrt(rr*rr+R4*R4)*cos(Psi*pi/180))
D,3245,uy,sqrt(rr*rr+R4*R4)*sin(Psi*pi/180)
D,3245,uz,0
D,2111,ux,-(sqrt(rr*rr+R3*R3)-sqrt(rr*rr+R4*R4)*cos(Psi*pi/180))
D,2111,uy,-sqrt(rr*rr+R4*R4)*sin(Psi*pi/180)
D,2111,uz,0
allsel
NLGEOM,ON                                ! nonlinear geometry
AUTOTS,ON
NSUBST,500,500000,50

```

NROPT,FULL,,ON

KBC,0

! Randbedingung (Eindringen) erfolgt über eine

Rampe

OUTRES,ALL,outres

! Ergebnisse von jedem 10-ten step

Solve

!-----Abrollen-----

Phi\_Ink=5

Schritte=30/Phi\_Ink

\*DO,k,1,Schritte

Time,k+1

!Parameter für Mittelpunkt

Phi0=Phi\_Ink\*k

Ur0=R4

!Parameter für punkt1

Alpha=(R4-R2)\*Phi0/R2

Theta1=Alpha-Phi0

Ur1=sqrt(rr\*rr+Ur0\*Ur0-2\*rr\*Ur0\*cos(Theta1\*pi/180))

Beta1=acos((Ur1\*Ur1+Ur0\*Ur0-rr\*rr)/(2\*Ur1\*Ur0))\*180/pi

Phi1=Phi0-Beta1

!Parameter für punkt2

Theta2=180-Theta1

Ur2=sqrt(rr\*rr+Ur0\*Ur0-2\*rr\*Ur0\*cos(Theta2\*pi/180))

Beta2=acos((Ur2\*Ur2+Ur0\*Ur0-rr\*rr)/(2\*Ur2\*Ur0))\*180/pi

Phi2=Phi0+Beta2

!Parameter für punkt3

Theta3=90+Theta1

Ur3=sqrt(rr\*rr+Ur0\*Ur0-2\*rr\*Ur0\*cos(Theta3\*pi/180))

Beta3=acos((Ur3\*Ur3+Ur0\*Ur0-rr\*rr)/(2\*Ur3\*Ur0))\*180/pi

Phi3=Phi0-Beta3+atan(rr/R3)\*180/pi

!Parameter für punkt4

Theta4=90-Theta1

Ur4=sqrt(rr\*rr+Ur0\*Ur0-2\*rr\*Ur0\*cos(Theta4\*pi/180))

Beta4=acos((Ur4\*Ur4+Ur0\*Ur0-rr\*rr)/(2\*Ur4\*Ur0))\*180/pi

Phi4=Phi0+Beta4-atan(rr/R3)\*180/pi

!Mittelpunkt

D,2101,ux,-(R3-Ur0\*cos(Phi0\*pi/180))

```

D,2101,uy,-Ur0*sin(Phi0*pi/180)

!Punkt1
D,2106,ux,-((R3-rr)-Ur1*cos(Phi1*pi/180))
D,2106,uy,-Ur1*sin(Phi1*pi/180)

!Punkt2
D,2711,ux,-((R3+rr)-Ur2*cos(Phi2*pi/180))
D,2711,uy,-Ur2*sin(Phi2*pi/180)

!Punkt3
D,3245,ux,-(sqrt(rr*rr+R3*R3)-Ur3*cos(Phi3*pi/180))
D,3245,uy,-Ur3*sin(Phi3*pi/180)

!Punkt4
D,2111,ux,-(sqrt(rr*rr+R3*R3)-Ur4*cos(Phi4*pi/180))
D,2111,uy,-Ur4*sin(Phi4*pi/180)

allsel
NLGEOM,ON
AUTOTS,ON
NSUBST,500,500000,50
NROPT,FULL,,ON
KBC,0
OUTRES,ALL,outres
solve

*ENDDO

!-----Verlassen-----
Time,k+2

!Parameter fur Mittelpunkt

Phi0=Phi_Ink*k
Ur0=R3

!Parameter fur punkt1
Alpha=(R4-R2)*Phi0/R2
Theta1=Alpha-Phi0
Ur1=sqrt(rr*rr+Ur0*Ur0-2*rr*Ur0*cos(Theta1*pi/180))
Beta1=acos((Ur1*Ur1+Ur0*Ur0-rr*rr)/(2*Ur1*Ur0))*180/pi
Phi1=Phi0-Beta1

```

**!Parameter fur punkt2**

**Theta2=180-Theta1**

**Ur2=sqrt(rr\*rr+Ur0\*Ur0-2\*rr\*Ur0\*cos(Theta2\*pi/180))**

**Beta2=acos((Ur2\*Ur2+Ur0\*Ur0-rr\*rr)/(2\*Ur2\*Ur0))\*180/pi**

**Phi2=Phi0+Beta2**

**!Parameter fur punkt3**

**Theta3=90+Theta1**

**Ur3=sqrt(rr\*rr+Ur0\*Ur0-2\*rr\*Ur0\*cos(Theta3\*pi/180))**

**Beta3=acos((Ur3\*Ur3+Ur0\*Ur0-rr\*rr)/(2\*Ur3\*Ur0))\*180/pi**

**Phi3=Phi0-Beta3+atan(rr/R3)\*180/pi**

**!Parameter fur punkt4**

**Theta4=90-Theta1**

**Ur4=sqrt(rr\*rr+Ur0\*Ur0-2\*rr\*Ur0\*cos(Theta4\*pi/180))**

**Beta4=acos((Ur4\*Ur4+Ur0\*Ur0-rr\*rr)/(2\*Ur4\*Ur0))\*180/pi**

**Phi4=Phi0+Beta4-atan(rr/R3)\*180/pi**

**!Mittelpunkt**

**D,2101,ux,-(R3-Ur0\*cos(Phi0\*pi/180))**

**D,2101,uy,-Ur0\*sin(Phi0\*pi/180)**

**!Punkt1**

**D,2106,ux,-((R3-rr)-Ur1\*cos(Phi1\*pi/180))**

**D,2106,uy,-Ur1\*sin(Phi1\*pi/180)**

**!Punkt2**

**D,2711,ux,-((R3+rr)-Ur2\*cos(Phi2\*pi/180))**

**D,2711,uy,-Ur2\*sin(Phi2\*pi/180)**

**!Punkt3**

**D,3245,ux,-(sqrt(rr\*rr+R3\*R3)-Ur3\*cos(Phi3\*pi/180))**

**D,3245,uy,-Ur3\*sin(Phi3\*pi/180)**

**!Punkt4**

**D,2111,ux,-(sqrt(rr\*rr+R3\*R3)-Ur4\*cos(Phi4\*pi/180))**

**D,2111,uy,-Ur4\*sin(Phi4\*pi/180)**

**allsel**

**NLGEOM,ON**

**AUTOTS,ON**

**NSUBST,500,500000,50**

**NROPT,FULL,,ON**

**KBC,0**

```

OUTRES,ALL,outres
solve

FINI

!=====
/POST1
csys,12
rsys,12

!-----
! Aufgabe 1
!-----
*GET,ns,ACTIVE,0,SOLU,NCMSS      ! Anzahl der Zeitschritte ermitteln --> ns

!----- Definition von Ausgabevektoren -----
*DIM,C1,ARRAY,(8*ns/outres)! Zaehler
*DIM,NSX,ARRAY,(8*ns/outres)      ! radiale Spannung
*DIM,NSY,ARRAY,(8*ns/outres)      ! tangentielle Spannung
*DIM,NSZ,ARRAY,(8*ns/outres)      ! axiale Spannung

*DO,i,1,(8*ns/outres)
      C1(i)=i*(outres/ns)          ! Anfangswerte setzen
*ENDDO

!-----
ALLSEL
*DO,j,1,8
*DO,i,1,(ns/outres)              ! loop for every 10th substep

      SET,j,outres*i
      zl=i+ns/outres*(j-1)
      GN=NODE(d/2-0.4,75,0)
      *GET,NSX_zl,NODE,GN,S,X      !
      *GET,NSY_zl,NODE,GN,S,Y      !
      *GET,NSZ_zl,NODE,GN,S,Z      !

      NSX(zl)=NSX_zl
      NSY(zl)=NSY_zl
      NSZ(zl)=NSZ_zl

*ENDDO
*ENDDO
ALLSEL
!-----

```

```

*CREATE,WriteRes.mac
/OUT,Ergebnis.dat
/COM,
/COM,
/COM,-----
/COM,|          c1          |          SX          |          SY          |          SZ          |
/COM,-----
*VWRITE,C1(1),NSX(1),NSY(1),NSZ(1)
(' ',F15.5,'   ',F15.5,'   ',F15.5,'   ',F15.5,'   ')
/COM,-----
/OUT
*END
/INPUT,WriteRes.mac
*LIST,Ergebnis.dat

!-----
! Aufgabe 2 : Tiefenprofil
!-----

SET,8,LAST      ! letzter Schritt (t = 7s)
csys,12
rsys,12

*DIM,NSX,ARRAY,(8)      ! Druckeigenspannungen
*DIM,Tiefe,ARRAY,(8) ! Abtragstiefen
ALLSEL

*GET,NSX(1),NODE,162,S,X  !
*GET,NSX(2),NODE,295,S,X  !
*GET,NSX(3),NODE,300,S,X  !
*GET,NSX(4),NODE,305,S,X  !
*GET,NSX(5),NODE,310,S,X  !
*GET,NSX(6),NODE,315,S,X  !
*GET,NSX(7),NODE,83,S,X   !
*GET,NSX(8),NODE,537,S,X  !

Tiefe(1)=0
Tiefe(2)=(NX(162)+UX(162))-(NX(295)+UX(295))
Tiefe(3)=(NX(162)+UX(162))-(NX(300)+UX(300))
Tiefe(4)=(NX(162)+UX(162))-(NX(305)+UX(305))
Tiefe(5)=(NX(162)+UX(162))-(NX(310)+UX(310))
Tiefe(6)=(NX(162)+UX(162))-(NX(315)+UX(315))
Tiefe(7)=(NX(162)+UX(162))-(NX(83)+UX(83))
Tiefe(8)=(NX(162)+UX(162))-(NX(537)+UX(537))
ALLSEL

```

```

!-----
*CREATE,WriteRes.mac
/OUT,Ergebnis,dat
/COM,
/COM,
/COM,-----
/COM,|      Tiefe      |      SX      |
/COM,-----
*VWRITE,Tiefe(1),NSX(1)
(' ',F15.5,'   ',F15.5,'   ')
/COM,-----
/OUT
*END
/INPUT,WriteRes.mac
*LIST,Ergebnis,dat

!-----

```



### **III Literaturverzeichnis**

[1] [www.ecoroll.de](http://www.ecoroll.de), 09.09.2009, Startseite > Verfahren > Vorteile: „Grundlagen des Festwalzens“

[2] [www.baublies.de](http://www.baublies.de), 09.09.2009, Startseite > Werkzeuge > Einrollenwerkzeuge, variabel > Innenkonturen

## **IV Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre, daß ich die vorliegende Arbeit selbständig, ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die in den beigefügten Verzeichnissen angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

[Ort], den [Datum]

[Unterschrift]